

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Průřez odebírané vrstvy materiálu a jeho vliv na měrný řezný odpor

Cross Section of Removed Material Layer and its Influence on Specific
Cutting Force

Student:

Bc. Martin Spurný

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.

Ostrava 2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Spurný**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Průřez odebírané vrstvy materiálu a jeho vliv na měrný řezný odpor**
Cross Section of Removed Material Layer and its Influence on Specific Cutting Force

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Obecná charakteristika daného problému.
3. Návrh metodiky experimentálních prací.
4. Vyhodnocení provedených testů.
5. Závěr a zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [2] HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Brno : MM Publishing Praha, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [3] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.

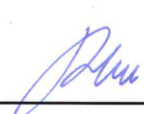
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.**

Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016




doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne..... 16.5. 2016

..... 

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mě požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne..... 16.5. 2016

..... 

podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Martin Spurný

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Čertoryje 236, 78375 Dub nad Moravou

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

SPURNÝ, M. *Průřez odebírané vrstvy materiálu a jeho vliv na měrný řezný odpor: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2016, 70 s. Vedoucí práce: Ing. Zlámal, T. Ph.D.

Diplomová práce se zabývá velikostí průřezu odebírané vrstvy materiálu a jeho vlivem na měrný řezný odpor při soustružení oceli 1.1191 a slitiny 2.4856. V teoretické části je práce zaměřena na proces obrábění a mechaniku tvorby třísky. Dále je teoretická část zaměřena na stanovení dynamického zatížení a měření silových poměrů při obrábění. V experimentální činnosti byly testovány 2 tvary vyměnitelných břitových destiček, a to z hlediska posouzení jejich vlivu na rozložení sil v průběhu obrábění a velikost jejich opotřebení. Testování bylo prováděno při podélném soustružení na CNC soustruhu NLX2500MC/700 od firmy DMG MORI. Pro každý materiál byla zvolena konstantní řezná rychlost a měnila se hodnota posuvu a hloubka řezu. V závěru práce jsou uvedeny a vyhodnoceny naměřené výsledky, na jejichž základě je provedeno vyhodnocení jednotlivých složek sil, výsledných sil řezání a měrných řezných odporů.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

SPURNÝ, M. *Surface Cross Section of Removed Material Layer and its Influence on Specific Cutting Force: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, assembly and engineering metrology, 2016, 70 p. Thesis head: Zlámal, T. MSc., Ph.D.

This thesis deals with surface cross-sectional size of removed material layer and its influence on specific cutting force in turning steel 1.1191 and alloy 2.4856. The theoretical part of the thesis is focused on the machining process and the mechanics of chip formation. Next theoretical part is focused on the determination of dynamic load and measuring the force conditions during machining. In the experimental work were tested two shapes of inserts, from the viewpoint of their influence on the distribution of forces during machining, and the size of their wear. Testing was performed at longitudinal turning CNC lathe NLX2500MC/700 from company DMG MORI. For each material was chosen constant cutting speed and changed the feed rate and depth of cut. In conclusion are presented and evaluated measured results on the basis of an evaluation of the individual components of forces resulting cutting forces and specific cutting resistance.

Obsah

Obsah	6
Seznam použitých značek a symbolů	8
Úvod.....	10
1 Proces obrábění	11
1.1 Nástroje pro obrábění	11
1.1.1 Nástrojové materiály.....	11
1.1.2 Geometrie břitu řezného nástroje	12
1.1.3 Druhy řezných nástrojů	14
1.2 Mechanika tvoření třísky	16
1.2.1 Faktory ovlivňující utváření třísky	18
1.2.2 Dělení třísky	19
1.2.3 Utvařeče a utvářecí diagramy	20
1.3 Řezné podmínky	22
1.4 Průřez třísky a jeho rozměry	26
2 Dynamické zatížení a silové poměry při obrábění	27
2.1 Měření složek síly řezání	32
3 Návrh metodiky experimentální práce	34
3.1 Použitý obráběný materiál	34
3.2 Obráběcí stroj	36
3.3 Použitý řezný nástroj	37
3.4 Použité břitové destičky.....	38
3.5 Řezné podmínky	39
3.5.1 Blokové schéma navrženého experimentu	42
4 Realizace experimentu	43
5 Zpracování naměřených dat	46
5.1 Vyhodnocení opotřebení vyměnitelných břitových destiček	47

5.2 Vyhodnocení silových poměrů při obrábění	51
Závěr	65
Použitá literatura	67

Seznam použitých značek a symbolů

A_D	jmenovitý průřez třísky	$[\text{mm}^2]$
D	průměr obrobku	$[\text{mm}]$
F	výsledná síla řezání	$[\text{N}]$
F_1	aktivní složka síly řezání	$[\text{N}]$
F_2	pasivní složka síly řezání	$[\text{N}]$
F_c	řezná složka síly řezání	$[\text{N}]$
F_f	posuvová složka síly řezání	$[\text{N}]$
F_n	normálová síla	$[\text{N}]$
F_{ok}	okamžitá síla	$[\text{N}]$
F_p	pasivní složka síly řezání	$[\text{N}]$
F_t	třecí síla	$[\text{N}]$
O, M, N	body ohraničující primární plastickou deformaci	$[-]$
P_c	řezný výkon	$[\text{W}]$
R	řezný odpor	$[\text{N}]$
R_m	pevnost v tahu	$[\text{MPa}]$
$S-N-O$	soustava stroj, nástroj, obrobek	$[-]$
SK	slinutý karbid	$[-]$
VBD	vyměnitelná břitová destička	$[-]$
a	tloušťka odebírané vrstvy	$[\text{mm}]$
a_1	tloušťka třísky	$[\text{mm}]$
a_p	hloubka řezu	$[\text{mm}]$
b_D	jmenovitá šířka třísky	$[\text{mm}]$
c_{Fc}	konstanta empirického vztahu pro výpočet síly	$[-]$
f	posuv nástroje	$[\text{mm}]$
h, b, f, l_1, l_2	rozměry nástrojového držáku	$[\text{mm}]$
h_D	jmenovitá tloušťka třísky	$[\text{mm}]$

k_c	měrný řezný odpor	[MPa]
l	délka soustružené plochy	[mm]
n	otáčky vřetene	[min ⁻¹]
r_ϵ	nástrojový poloměr špičky	[mm]
s	tloušťka vyměnitelné břitové destičky	[mm]
$s(x)$	výběrová směrodatná odchylka	[-]
u_A	standartní nejistota typu A	[-]
u_B	standartní nejistota typu B	[-]
u_C	kombinovaná standartní nejistota	[-]
v_c	řezná rychlost	[m.min ⁻¹]
v_f	posuvová rychlost	[mm.min ⁻¹]
x	šířka stabilizační fazetky	[mm]
\bar{x}	výběrový průměr	[-]
x^{Fc}	exponent z empirického vztahu pro výpočet řezné síly	[-]
y^{Fc}	exponent z empirického vztahu pro výpočet řezné síly	[-]
α_o	úhel hřbetu nástroje v ortogonální rovině	[°]
γ	úhel čela	[°]
γ_o	úhel čela nástroje v ortogonální rovině	[°]
δ	úhel řezu	[°]
ϵ_r	úhel špičky nástroje	[°]
λ_s	úhel sklonu ostří	[°]
κ_r	úhel nastavení hlavního ostří	[°]
φ	úhel stříhu	[°]
φ_1	úhel kluzu	[°]

Úvod

Obsahem Mé diplomové práce je stanovení vlivu průřezu odebírané vrstvy materiálu a jeho vliv na měrný řezný odpor. V této práci je popsán proces obrábění, tvorba třísky, vliv řezných podmínek, dynamické zatížení a silové poměry, které doprovázejí proces obrábění. Byl zvolen návrh experimentální práce obrábění a následně proběhlo obrábění a zpracování experimentu.

Cílem diplomové práce je naměření vlivu velikosti odřezávané vrstvy na složky řezných sil během procesu obrábění a následné vyhodnocení naměřených dat a také pozorování velikosti opotřebení vyměnitelných břitových destiček. Obrábění bude probíhat na CNC soustruhu NLX2500MC/700 a budou použity vyměnitelné břitové destičky CNMG 120408 – SM a CNMX 1204A2 – SM. Jako materiály určené k experimentu jsou dle označení W.Nr. ocel 1.1191, která je referenčním materiálem pro třídu ocelí a niklová slitina 2.4856. Tato slitina má výborné mechanické a fyzikální vlastnosti za nízkých i vysokých teplot. Pro svoji žáruvzdornost a odolnost proti korozi se tato slitina používá pro součásti, které jsou dlouhou dobu vystaveny nepříznivým vlivům prostředí.

Dle doporučených hodnot byly zvoleny pro každý materiál dva odlišné druhy řezných podmínek tak, aby zůstal v průběhu obrábění průřez třísky stejný. Pro každý materiál byla konstantní řezná rychlost a měnily se hodnoty posuvu a hloubka řezu.

Na základě takto vypočtených údajů a výsledků měření bylo provedeno vyhodnocení hodnot řezných složek sil, byla určena výsledná síla řezání a velikost měrného řezného odporu. Měření se uskutečnilo pomocí třísložkového dynamometru. Pro názornost opotřebení vyměnitelných břitových destiček, byla provedena jejich kontrola pod binokulárním mikroskopem. Cílem bylo zhodnocení měrného řezného odporu při obrábění dvou různých materiálu při obrábění dvěma vyměnitelnými břitovými destičkami, za daných řezných podmínek.

1 Proces obrábění

Obrábění kovů je technologický proces, při kterém se odebíráním materiálu vytváří požadovaný tvar povrchu obrobku. Při obrábění je ostří nástroje velkou silou vtlačováno do materiálu obrobku, který je deformován tak silně, že se odděluje ve formě třísek. Na procesu obrábění se velkou měrou podílí obrobitelnost materiálu. Z technologického hlediska je obrobitelnost jednou z nejdůležitějších vlastností materiálu, která ovlivňuje řezný proces, ekonomickou stránku výroby. Je hlavním činitelem pro volbu řezných podmínek a funkci nástroje. Při obrábění má obrobitelnost materiálu vliv na formování a utváření třísky, velikost složek síly řezání, množství tepla a teplotu v řezu, opotřebení, trvanlivost a životnost řezného nástroje, a v neposlední řadě také integritu obrobeného povrchu. [8]

1.1 Nástroje pro obrábění

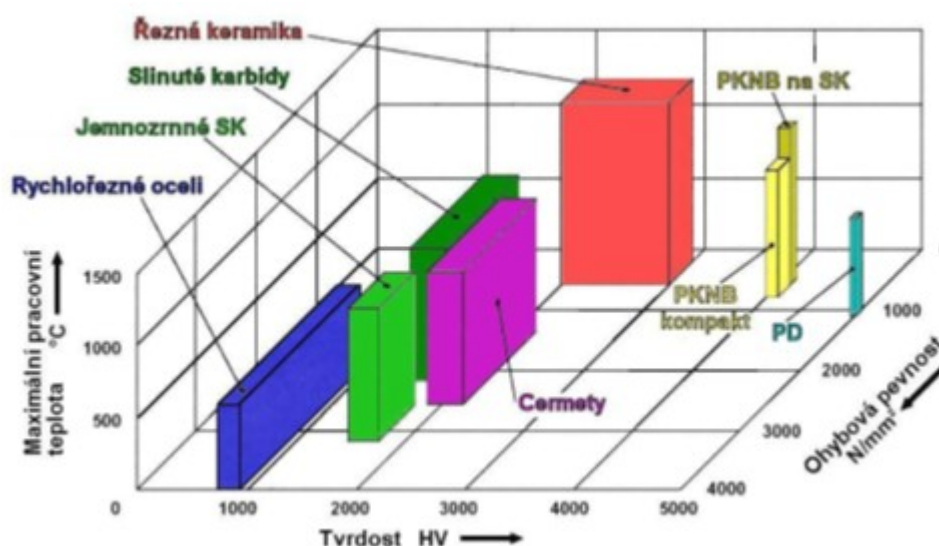
Při obrábění různých druhů materiálů obrobků je důležitá správná volba řezného nástroje a materiálu, ze kterého je vyroben. Pro volbu řezného nástroje má rozhodující vliv jeho namáhání. Na nástroje je požadována dobrá odolnost vůči opotřebení, houževnatost a vysoká pevnost, dobrá odolnost vůči teplotním šokům, vysoká tvrdost za tepla, chemická stabilita za vysokých teplot. Specifické jsou také požadavky na řeznou geometrii nástroje. Ta musí za daných řezných podmínek splňovat dostatečnou pevnost, klidný průběh obrábění bez chvění a vibrací, maximální trvanlivost. Při volbě řezné geometrie nástroje je důležité brát ohled i požadavky na přesnost a kvalitu obrobeného povrchu. [8]

1.1.1 Nástrojové materiály

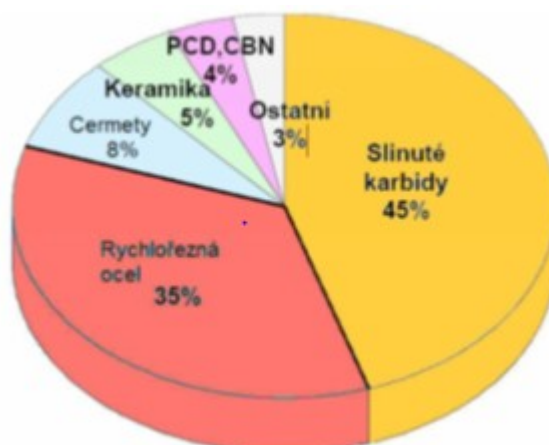
V dnešní době je možno použít velkého výběru nástrojových materiálů a výzkum v této oblasti přináší stále nové možnosti. Na materiál nástroje jsou kladeny vysoké nároky, proto je výběr vhodného nástrojového materiálu důležitý hlavně z hlediska produktivity obrábění. Volba nástroje závisí především na druhu obráběného materiálu, technologii výroby polotovaru, plynulosti řezu, obráběcím stroji, požadavcích na kvalitu obrobené plochy, ekonomické náročnosti řezného materiálu a nedílnou součástí je ekonomická stránka. [19]

Nejvyužívanějšími typy nástrojových materiálů pro obrábění jsou rychlořezné oceli, řezná keramika, slinuté karbidy, kubický nitrid bóru a diamant. Každý z těchto materiálů má své specifické vlastnosti a je tak vhodný pro jiné řezné podmínky a obráběné materiály.

Vybrané vlastnosti řezných materiálů je možno vidět na obr. 1.1. Z obrázku 1.2 můžeme vidět procentuální zastoupení řezných materiálů ve výrobě. [5]



Obr.1.1 Hodnoty vybraných vlastností řezných materiálů [5]



Obr. 1.2 Procentuální zastoupení řezných materiálů ve výrobě [18]

1.1.2 Geometrie břitu řezného nástroje

Volba správné geometrie břitu nástroje je dána pracovní oblastí operace (hrubování, obrábění načisto, atd.), při těchto operacích se opracovávají materiály a obrobky na požadovanou kvalitu obrobeného povrchu a požadovaný rozměr. Další důležitý faktor, který ovlivňuje volbu geometrie břitu nástroje, je materiál obrobku. Geometrie řezného nástroje by měla splňovat požadavky především na dostatečnou pevnost řezného klínu, zajištění klidného průběhu obrábění bez vibrací a chvění, odolnost proti opotřebení

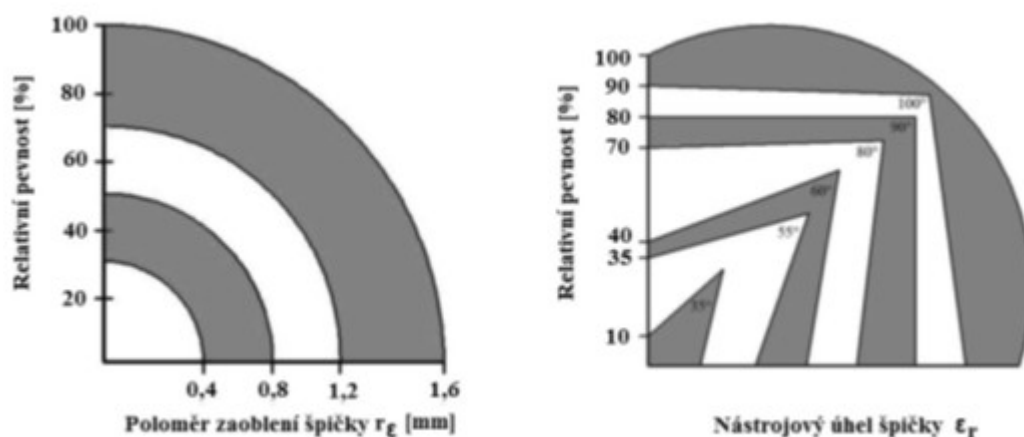
a maximální trvanlivost řezného klínu nástroje. Při volbě řezné geometrie nástroje je třeba vzít v úvahu i technologické požadavky na přesnost a kvalitu obrobeného povrchu.

Při volbě geometrie řezného nástroje se nejčastěji setkáváme s úhly γ_o , α_o , λ_s , κ_r , které společně s poloměrem špičky r_ϵ , určují tvar řezného klínu nástroje. Velikost jednotlivých úhlů výrazně ovlivňuje řezný proces a je vhodné je měnit v závislosti na mechanických vlastnostech obráběného materiálu, tuhosti použitého stroje a požadované kvalitě obrobeného povrchu. Právě z uvedených úhlů má největší význam na proces obrábění úhel čela v rovině ortogonální γ_o , velikost tohoto úhlu ovlivňuje intenzitu plastické deformace, řeznou sílu, velikost tření třísky na čele nástroje a intenzitu opotřebení nástroje. Úhel hřbetu v rovině ortogonální α_o určuje polohu hřbetu nástroje a jeho velikost ovlivňuje intenzitu tření mezi nástrojem a přechodovou plochou při obrábění. Zvyšující se hodnoty těchto dvou úhlů mají za následek snížení pevnosti řezného klínu. Menší úhly v kombinaci s malými hodnotami posuvu a vyšší řeznou rychlostí jsou vhodné především pro obrábění materiálů s vyšší pevností. Úhel sklonu ostří λ_s ovlivňuje směr odchodu třísky při obrábění a jeho velikost má také vliv na pevnost řezného klínu. Záporné úhly sklonu je vhodné používat pro obrábění materiálů s vyšší pevností a kladné úhly pro obrábění měkkých materiálů a menších průřezích třísky. Vykloněním nástroje s velkým poloměrem špičky o úhel sklonu ostří λ_s lze v soustavě S-N-O předejít vzniku nežádoucích vibrací. Velikost úhlu κ_r , který svírá nástrojová rovina boční s rovinou hlavního ostří, ovlivňuje délku řezné hrany v záběru, tvar třísky a také mění směr působení řezných sil. S rostoucím úhlem nastavení hlavního ostří nástroje κ_r klesá řezný odpor, ale zvyšuje se intenzita opotřebení řezné hrany nástroje. S klesajícím úhlem κ_r roste síla F_p , dochází k průhybu obrobku a vyšším požadavkům na tuhost soustavy S-N-O.

Na pevnost nástroje má vliv i tvar vyměnitelné břitové destičky, který by měl být v souladu s úhlem nastavení hlavního ostří κ_r , s úhlem špičky ϵ_r a nástrojovým poloměrem hrotu r_ϵ , viz obr. 1.3. S klesajícím úhlem ϵ_r , který svírá nástrojová rovina hlavního a vedlejší ostří, klesá relativní pevnost břitové destičky. Z obrázku vyplývá, že největší relativní pevnost mají destičky kruhového tvaru.

Poloměr špičky vyměnitelné břitové destičky je klíčovým faktorem pro stabilitu při hrubovacích operacích, ale ovlivňuje i stav obrobeného povrchu při obrábění načisto. Při soustružení načisto vyšší hodnoty poloměru špičky společně s rychlostí posuvu určují jakost a výšku mikronerovností obrobeného povrchu. S vyšším poloměrem špičky nástroje se zvětšuje délka řezné hrany v záběru, která pomáhá rozptýlit teplo vzniklé řezáním. Na druhou stranu dochází se zvětšující se řeznou hranou k nárůstu radiální řezné síly

a nebezpečí vzniku vibrací v soustavě S-N-O. Proto se doporučuje vyměnitelnou břitovou destičku s velkým poloměrem špičky vyklonit o úhel sklonu řezné hrany λ_s a zkrátit délku řezné hrany v záběru. [5, 8, 28]



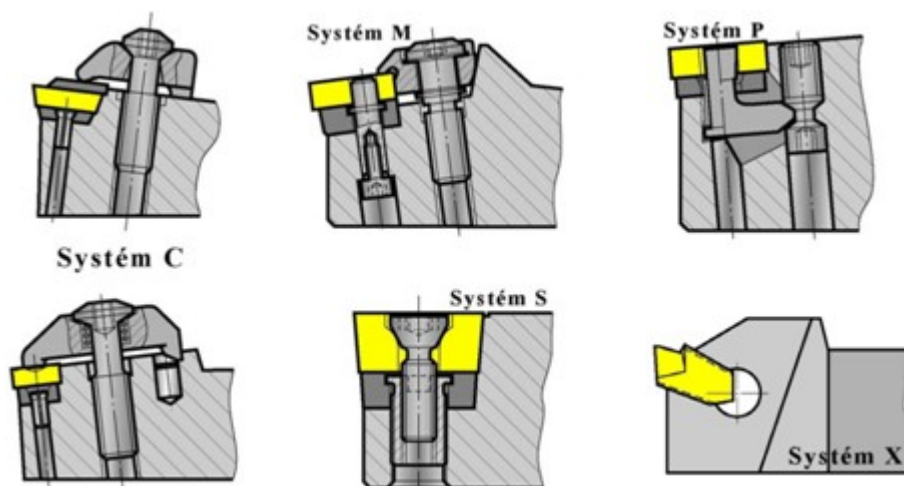
Obr. 1.3 Závislost relativní pevnosti břitové destičky na úhlu a poloměru špičky [5]

Z pohledu univerzálnosti a efektivní řezivosti nástrojů jsou v mnoha ohledech obrábění vhodnější břitové destičky s pozitivní řeznou geometrií a velkým úhlem nastavení hlavního ostří. Tyto destičky umožňují efektivně odebírat třísku z povrchu obráběného materiálu, ale při obrábění vysokými řeznými a posuvovými rychlostmi může dojít ke vzniku nerovností, špatné jakosti obrobeného povrchu a snížení trvanlivosti řezného klínu nástroje. Velký poloměr zaoblení špičky břitových destiček napomáhá předejít plastické deformaci řezné hrany, destrukci špičky účinkem překročení meze tepelné stability řezného materiálu VBD a použít vyšší řeznou i posuvovou rychlost obrábění. [8]

1.1.3 Druhy řezných nástrojů

Soustružnické nože se v dnešní době nejčastěji rozlišují na nože s pájenými nebo vyměnitelnými břitovými destičkami. Ještě se lze také setkat s monolitními soustružnickými noži, ale ty se v moderních firmách již prakticky nevyskytují. Nejvíce používané jsou radiální nože, které lze dělit podle konstrukce, směru posuvového pohybu, způsobu obrábění, tvaru tělesa nože a použitého nástrojového materiálu. V závislosti na konstrukci dělíme radiální nože na celistvé, s pájenými břitovými destičkami a s vyměnitelnými břitovými destičkami. U monolitních nožů je vyrobeno těleso i řezná část nože z nástrojového materiálu. Jako další typ soustružnických nožů jsou nože s pájenými břitovými destičkami, kde břitová destička z řezného materiálu je pájena tvrdou pájkou na těleso nože z konstrukční oceli. V současné době nepoužívanější typ soustružnických nožů, jsou nože s vyměnitelnými břitovými destičkami, u této konstrukce

je břitová destička z řezného materiálu mechanicky upnuta v nožovém držáku z konstrukční oceli. Tyto systémy upínání ISO je možno vidět na obrázku 1.4. [5]



Obr. 1.4 Systémy upínání vyměnitelných břitových destiček [5]

Vyměnitelné břitové destičky radiálních nožů mohou být vyrobeny ze slinutých karbidů, řezné keramiky, cermetů, polykrystalického kubického nitridu boru a polykrystalického diamantu. Různé typy destiček je možno vidět na obrázku 1.5. Čela destiček bývají buď hladká, nebo jsou na nich vytvořeny předdlisované, u supertvrdých nástrojových materiálů vybroušené utvařeče třísky. Skoro všechny v současné době používané destičky jsou vícebřité a po otupení jednoho břitu se mohou pootočit do nové polohy. Například na čtvercové oboustranné destičce se nachází osm využitelných břitů. Výměna destiček je rychlá a snadná a polohu břitu obvykle není nutné seřizovat. Břitové destičky jsou uloženy v nožovém držáku tak, aby řezné odpory směřovaly do stěn pro ně vytvořených vybrání a nezatěžovaly upínací mechanismus. [5]



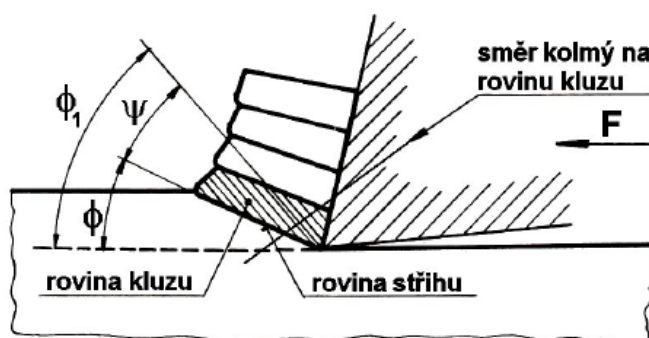
Obr. 1.5 Vyměnitelné břitové destičky + nástrojové držáky [24]

Některé radiální soustružnické nože s vyměnitelnými břitovými destičkami bývají stavitelné. Pro tento typ nožů je břitová destička upnuta do speciální vložky, která se pak připevňuje k základnímu držáku pomocí šroubů, posouvající vložku v podélné nebo i příčné ose nože, v určitém rozsahu je možno nastavit polohu špičky destičky. [5]

Soustružnické nože i vyměnitelné břitové destičky ze slinutých karbidů jsou označovány jednotným systémem ISO, který používají všichni výrobci nástrojů a nástrojových materiálů.

1.2 Mechanika tvoření třísky

Při vnikání řezného nástroje do materiálu obrobku je břit tlačěn do obrobku silou F a před a pod břitem se koncentruje napětí, které způsobuje pružné a plastické deformace obráběného materiálu což je možno zjednodušeně vidět na obrázku 1.6. Smykové napětí narůstá, až dochází k plastické deformaci materiálu před břitem nástroje (posuv jednotlivých vrstev materiálu v kluzných rovinách pod úhlem kluzu ϕ_1). [5]



Obr. 1.6 Vznik třísky [5]

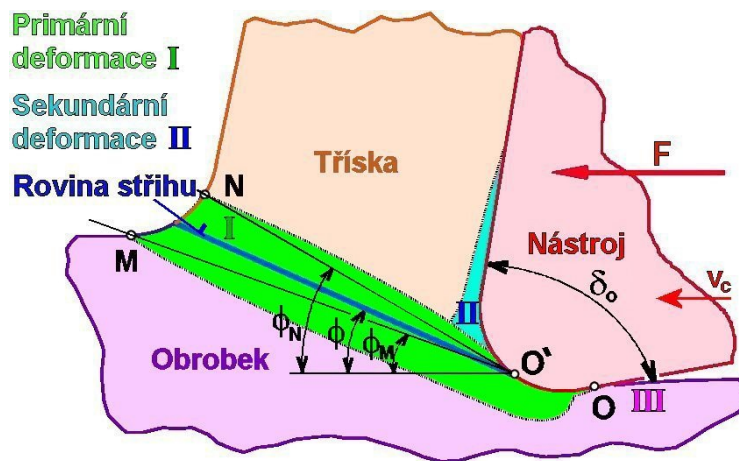
Pohyb nástroje pokračuje, proto se dále zvyšuje plastická deformace a dochází k posunu a pěchování vrstev materiálu před břitem nástroje, a to ve směru, který je kolmý ke kluzným rovinám. Tím jsou vyčerpány všechny možnosti plastické deformace materiálu v mikroobjemu. Při dalším pohybu nástroje dále roste napětí v materiálu, až dosáhne hodnoty vyšší než je stříhová mez pevnosti obráběného materiálu a dojde k odstřížení segmentu třísky v rovině stříhu pod úhlem stříhu ϕ - jednotlivé části třísky jsou dobře vidět na obrázku kořene třísky, viz obr. 1.7. Rozdíl mezi úhly ϕ_1 a ϕ se pohybuje v rozmezí $\psi = (0 \div 30)^\circ$, nízké hodnoty úhlu ψ vykazují tvárné materiály například ocel, vysoké hodnoty vykazují křehké materiály například šedé litiny. [5]



Obr. 1.7 Kořen třísky [5]

Při vniknutí břitu nástroje do obráběného materiálu dochází k pružným a následně plastickým deformacím v oblastech, které můžeme vidět na obrázku 1.8. Před břitem nástroje vzniká oblast primární plastické deformace (I - OMNO'), v povrchových vrstvách styčné plochy třísky s čelem nástroje se nachází II - sekundární plastická deformace a v povrchové vrstvě obrobené plochy (III). [5]

Velikost a tvar oblasti OMNO', jakož i stav napjatosti v této oblasti jsou značně proměnlivé a závisí na fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu, a to zejména na jeho deformační a zpevňovací schopnosti, dále závisí na řezné rychlosti v_c , s rostoucí v_c se deformační oblast zužuje, úhly φ_M i φ_N rostou - φ_M rychleji než φ_N a při vysoké řezné rychlosti plochy O'M a O'N prakticky splývají a ke vzniku třísky dochází plastickým skluzem v jediné střižné rovině. Velikost a tvar oblasti OMNO' závisí také na geometrii nástroje, a to zejména úhlech čela γ a řezu δ a řezném prostředí, mezi které je možno zařadit například chlazení - vzduch, řezná kapalina. [5]



Obr.1.8 Deformační oblasti [5]

Plastická deformace obráběného materiálu v procesu řezání způsobuje: [5]

- oddělení třísky od obrobku (v oblasti I),
- mechanické zatížení nástroje řeznými odpory (největší vliv má oblast I, menší oblast II, nejmenší oblast III),
- tepelné zatížení nástroje (největší vliv má oblast I, menší oblast II, nejmenší oblast III),
- opotřebení nástroje (na čele v důsledku vlivu oblasti II, na hlavním hřbetě v důsledku vlivu oblasti III),
- změnu textury materiálu ve třísce (vliv oblasti I) i v povrchové vrstvě obrobené plochy (vliv oblasti III, částečně i oblasti I)
- vznik zbytkových napětí v povrchové vrstvě obrobené plochy (zejména oblast III, částečně i oblast I),
- přechování třísky (oblasti I a II) - průřez a délka třísky neodpovídají teoretickým hodnotám.

1.2.1 Faktory ovlivňující utváření třísky

Hlavní faktory, ovlivňující utváření třísky jsou zejména hloubka řezu a posuv nástroje, dále úhel nastavení a částečně i poloměr špičky. Základním požadavkem je dosáhnout obloukovité nebo spirálovité třísky vhodné délky, kterou je možno snadno odvézt z místa řezu. Hloubka řezu určuje šířku třísky a má velký vliv na její tvar. Spolu s úhlem nastavení určuje délku břitu, který je v řezu. Při úhlu nastavení 90° se tato délka rovná hloubce řezu, při úhlu nastavení 45° je však podstatně delší.

Úhel nastavení spolu s poloměrem špičky VBD ovlivňuje utváření třísky tím, že mění její průřez. Je-li zvolen menší úhel nastavení, získáme menší tloušťku a větší šířku třísky. Mění se i směr odvádění třísky, obvykle výhodně a změní se i stoupání šroubovice

třísky. Způsob utváření a směr odvodu třísek také závisí na společném vlivu hloubky řezu a poloměru špičky. Bude-li malá hloubka řezu a relativně velký poloměr špičky, je břit v záběru tvořen zejména zaoblenou špičkou, což podporuje vznik spirálových třísek. Při větší hloubce řezu se vliv poloměru špičky snižuje, více se uplatní skutečný úhel nastavení, který třísku otáčí směrem ven. Tento proces je samozřejmě ovlivněn průřezem třísky, potažmo hodnotou posuvu.

Čtvercový průřez třísky, kdy se její tloušťka blíží šířce, obvykle poukazuje na její příliš velké stlačení, zatímco tenká tříska tvaru pásky je příliš dlouhá. Nadměrná tloušťka třísky má na proces obrábění negativní vliv. Zejména je-li zvýšen posuv nad určitou mez, tříska může odcházet mimo utvařeč, takže není řízeně utvářena.

Při dokončování zabírá VBD hlavně poloměrem špičky, proto se geometrie dokončovacích VBD zaměřují hlavně na špičku, zatímco hrubovací VBD mají geometrii na celém čele. Jiné širokorozsahové VBD jsou opatřeny kombinací utvařečů od rohů přes celou šířku VBD a utváří třísku v široké střední oblasti.

Specifické utváření třísky je při obrábění zápichů a upichování, protože obráběné plochy vznikají po obou stranách VBD. Proto musí být třísky utvářeny tak, aby byly užší než vytvořená drážka, jinak by se v ní mohly zasekávat a poškozovat její stěny. Tvar třísky musí také umožnit její snadný odchod, aby obráběcí proces nebyl ovlivněn tvorbou dlouhých a nepříznivě stočených třísek. Proto probíhá utváření třísky při zapichování a upichování ve dvou rovinách: nejprve se tříska lehce prohne podél svojí osy, a dále je v podélném směru stáčena do tvaru spirály.

Při volbě VBD je třeba vycházet z maximální hloubky řezu, která je při dané operaci dosažena a z úhlu nastavení nástroje. Obvykle se doporučuje, aby délka břitu v řezu byla cca polovina efektivní délky řezné hrany VBD, a hlubší řezy by měly být omezeny pouze na krátké časové úseky. Je-li efektivní délka řezné hrany menší, je nutno použít větší VBD nebo rozdělit operaci na více třísek. Výjimkou jsou operace s kruhovými VBD, s velmi malými úhly břitu a malými poloměry špičky. [20]

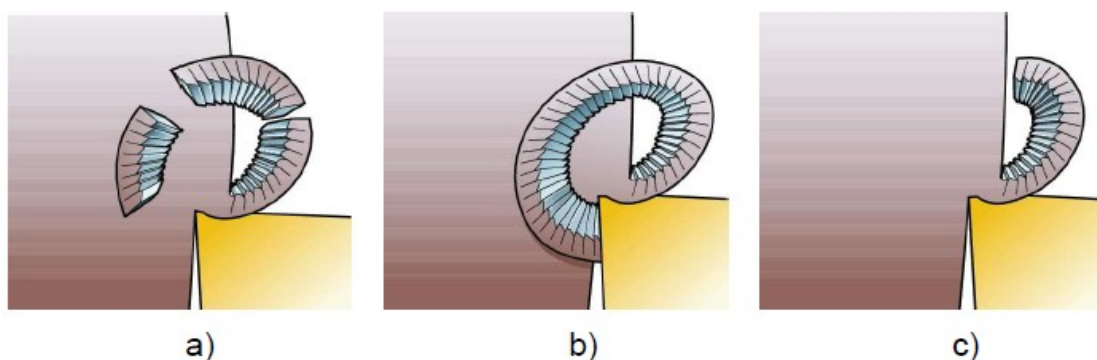
1.2.2 Dělení třísky

Materiály s krátkou nebo drobivou třískou žádné utváření nevyžadují, zatímco u materiálů s dlouhou třískou zpravidla výchozí zakřivení třísky nestačí k jejímu dělení na segmenty o požadované délce.

Dělení odcházející třísky se děje třemi základními mechanismy v závislosti na geometrii VBD a nástroje, materiálu obrobku a řezných podmínkách: [20]

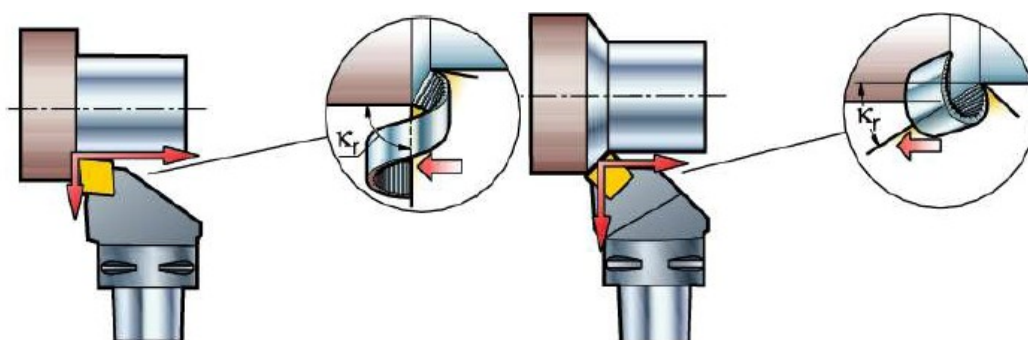
1. Samovolným odlomením, například při soustružení litiny viz obr. 1.9 a).

2. Odlomením proti nástroji viz obr. 1.9 b).
3. Odlomením proti obrobku viz obr. 1.9 c)



Obr. 1.9 Způsoby lámání třísky: samovolným odlomením (a), odlomením proti nástroji (b) a odlomením proti obrobku (c) [20]

Kterýkoliv z těchto způsobů může být při určitém případě obrábění nevýhodný, což je nutno řešit změnou geometrie nebo řezných podmínek viz obrázek 1.10. [20]

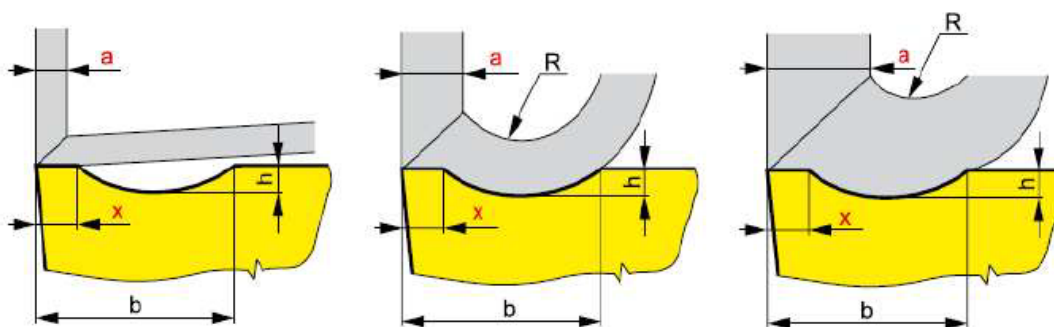


Obr. 1.10 Příklad vlivu velkého (a) a malého (b) úhlu nastavení na způsob lámání třísky [25]

1.2.3 Utvařeče a utvářecí diagramy

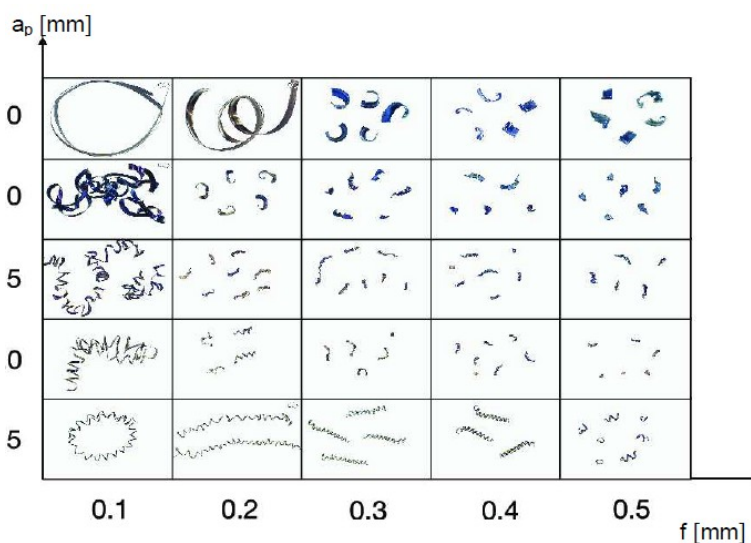
Utvařeč třísky ve svém původním a nejjednodušším provedení měl podobu překážky pro odchod třísky. Tento typ měl řadu nevýhod a negativně ovlivňoval výkon obrábění. V současné době VBD vybavené předlisovanými utvařeči jsou složitou kombinací tvarů, úhlů, vybrání a plošek pro optimalizaci utváření třísky mechanikou řezu, kontaktní délkou, lámáním třísky apod. Většinou mají kladný úhel čela v kombinaci s negativním sklonem lůžka v nástrojovém držáku. To je osvědčený systém, který napomáhá dobrému utváření. Každý utvařeč láme třísku pouze v určitém rozmezí posuvu a hloubky řezu. Minimální posuv, při kterém začíná utvařeč pracovat, je závislý zejména na šířce stabilizační fazetky x a na jejím úhlu. Maximální posuv, při kterém funkce utvařeče končí, je u žlábkového

utvařeče závislý na vzdálenosti výstupní hrany od ostří b a na hloubce žlábků h . Způsob utváření je také závislý na poměru odřezávané vrstvy a (je reprezentována hodnotou posuvu) a šířky fazetky x . Je-li $a < x$ (obr. 1.11 a), dochází ke kontaktu třísky pouze v oblasti fazetky, tříska nemůže vniknout do utvařeče a není utvářena. V případě na obr. 1.11 b), kdy $x < a$ (kde je použit vyšší posuv) zaplní tříska žlábek utvařeče a je jím utvářena, tj. zakřivena pod poloměrem R . Při dalším zvýšení posuvu ($x \ll a$) dochází k nadměrnému, tj. příliš tvrdému utváření až drcení třísky (obr. 1.11 c). Další zvýšení posuvu by mělo za následek to, že tříska by minula utvařeč, aniž by jím byl ovlivněn její tvar. [20]

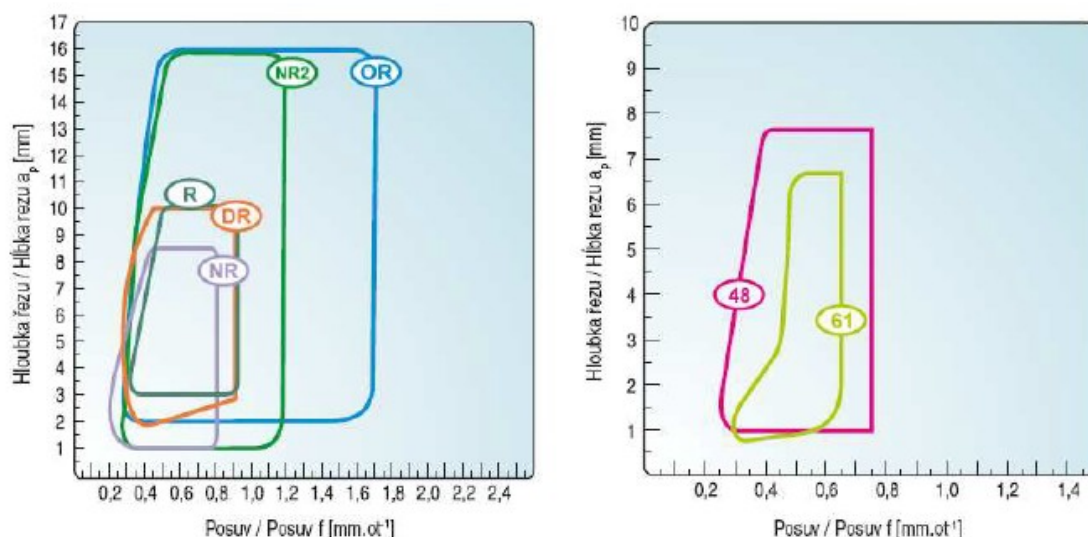


Obr. 1.11 Utváření třísky při různém poměru posuvu a šířky fazetky [21]

Diagram, znázorňující oblast utváření třísky v souřadném systému, kdy na osu x je nanášena velikost posuvu na otáčku f a na osu y šířka záběru ostří a_p , se nazývá utvářecí diagram (obr. 1.12 a 1.13). Tyto diagramy jsou klíčové ke správnému použití VBD s určitou geometrií. Ve výrobním programu většiny výrobců nechybí geometrie pro všechny nejrozšířenější materiály obrobků, zahrnující nejrozličnější aplikace od obrábění načisto přes střední obrábění až po těžké hrubování. [20]



Obr. 1.12 Příklad tvorby utvářecího diagramu; přijatelné tvary třísky jsou ve střední části diagramu [20]



Obr. 1.13 Příklady utvářecích diagramů geometrií VBD pro hrubovací soustružení (Pramet Tools) [21]

1.3 Řezné podmínky

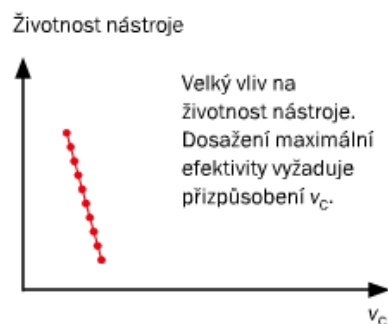
Pod pojmem řezné podmínky je třeba rozumět zejména stanovení řezné rychlosti v_c , posuvu f a tloušťky obráběné vrstvy (hloubky řezu) a_p . [1]

- **Řezná rychlost v_c**

Je rychlost, kterou se pohybuje obvod obrobku ve směru proti břitu řezného nástroje. K získání hodnoty řezné rychlosti, musíme vynásobit obvod obráběného průměru otáčkami vřetene. Otáčky vřetene jsou přímo úměrné rychlosti. Je-li průměr uveden v milimetrech, musí být výsledek dělen 1000, k získání hodnoty řezné rychlosti v metrech za minutu. [2]

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad 1.3.1$$

Řezná rychlost má velký vliv na životnost řezného nástroje. Jestliže je příliš nízká, dochází k tvorbě nárůstku na břitu, dochází k otupení břitu a drsnost povrchu je špatná. Příliš vysoká řezná rychlost způsobuje rychlé opotřebení hřbetu nástroje, špatnou kvalitu obrobené plochy. Vzniká plastická deformace, na nástroji vzniká rychlé opotřebení ve tvaru žlábků. [25]



Obr. 1.14 Vliv řezné rychlosti na životnost nástroje [25]

- **Posuv f**

Je dráha, kterou vykoná nástroj za jednu otáčku obrobku. Při hrubování je hodnota posuvu 0,4 až 5 mm, při dokončovacích operacích 0,06 až 0,3 mm a při jemném soustružení 0,005 až 0,05 mm. Protože se při soustružení nástroj posunuje při jedné otáčce o hodnotu posuvu, je možné stanovit rychlost posuvu v závislosti na otáčkách vřetene: [1]

$$v_f = n \cdot f \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}] \quad 1.3.2$$

kde f – posuv na otáčku [mm], n – počet otáček vřetene [min^{-1}].

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}] \text{ [1]} \quad 1.3.3$$

Rychlost posuvu v_f je hodnota strojního posuvu, při němž je nástroj veden různými směry vzhledem k obrobku

Posuv na otáčku f (mm) je dráha, kterou urazí špička bříty při každé otáčce obrobku. Jde o podstatnou hodnotu, která určuje jakost obrobené plochy a zajišťuje, aby se utváření třísky shodovalo s výkonem, určeným geometrií bříty. Tato hodnota neovlivňuje pouze tloušťku třísky, ale také kvalitu utváření třísky. [2]

Při příliš nízké rychlosti posuvu vznikají dlouhé spojité třísky. Dochází k rychlému opotřebení hřbetu a vytváří se nárůstek na bříty nástroje. Je-li rychlost posuvu příliš vysoká, je vysoká spotřeba energie a dochází k zasekávání a navařování třísek. [25]



Obr. 1.15 Vliv rychlosti posuvu na životnost nástroje [25]

- **Hloubka řezu a_p**

Je rozdíl mezi obráběnou a obrobenou plochou. Je-li vzán za základ průměr neopracovaného obrobku a odečte se průměr obrobeného obrobku, je nutné výsledek dělit dvěma. Hloubka řezu se měří vždy kolmo k ose posuvu, nikoliv k ose bříty. [2]

Hloubka řezu se při soustružení pohybuje od hodnoty několika desetin mm až po několik mm. Velikost posuvu, hloubka řezu, úhel nastavení a tvar řezné hrany v záběru mají vliv na velikost a tvar průřezu třísky. Rozměr průřezu třísky pro základní druhy soustružení je možno podle obr. 1.16 vypočítat ze vztahu: [1]

$$\text{Pro podélné soustružení } a_p = 0,5 \cdot (D - d) \text{ [mm]} \quad 1.3.4$$

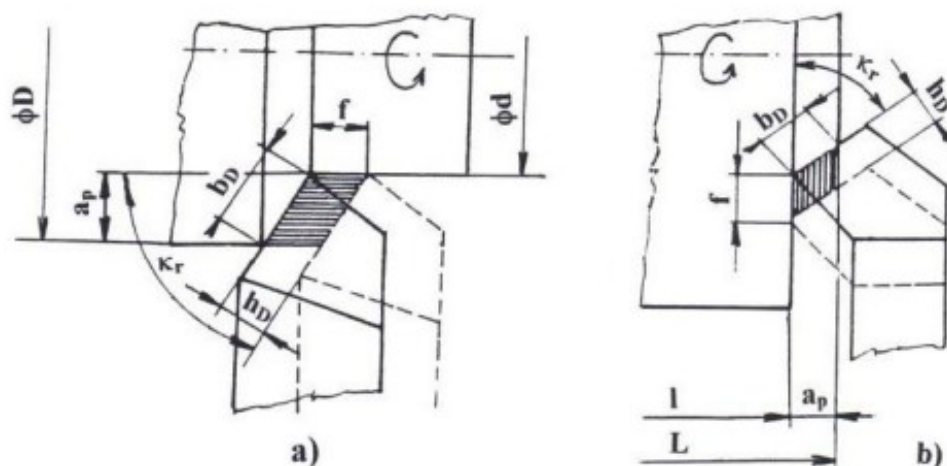
Kde: D – průměr obráběné plochy [mm],

d – průměr obrobené plochy [mm].

$$\text{Pro čelní soustružení } a_p = L - l \text{ [mm]} \quad 1.3.5$$

Kde: L – délka obráběné plochy [mm],

l – délka obrobené plochy [mm].



Obr. 1.16 Průřez třísky při soustružení [1]

Je – li hloubka řezu příliš malá, dochází ke ztrátě kontroly utváření třísek, vznikají vibrace, začíná se tvořit nadměrné množství tepla. Naopak je-li hloubka řezu příliš velká, spotřebovává se příliš velké množství energie, dochází k rychlému nárůstu velikosti řezných sil a dochází k lomům břitových destiček. Hloubka řezu má vliv na životnost nástroje viz obr. 1.17. [25]



Obr. 1.17 Vliv hloubky řezu na životnost nástroje [25]

Úhel nastavení hlavního ostří

Jakým způsobem proniká břit nástroje do obrobku, závisí na velikosti úhlu nastavení hlavního ostří κ_r . Je to úhel, tvořený hlavním ostřím vyměnitelné břitové destičky a směrem posuvu. Je důležitý pro volbu soustružnického nože. Úhel nastavení hlavního ostří neovlivňuje pouze utváření třísky, ale má vliv například i na směr působení řezných sil, efektivní délku ostří, polohu břitu vůči obrobku a také na to, jaké operace lze daným nástrojem provádět. Velikost nastavení hlavního ostří se nachází zpravidla v rozmezí od 45° do 90° , ale pro kopírování a soustružení tvarů je často účelné použít úhel větší 90° . [2]

Úhel nastavení hlavního ostří může být volen tak, aby nástroj mohl pracovat při různém směru posuvu. Tím se obrábění stává mnohostranným a je možno dosáhnout snížení počtu nástrojů potřebných pro obrobení dané součásti. Alternativně může být břit opatřen delším ostřím. Tloušťku třísky lze zredukovat a tím zatížení břitu rozdělit na větší plochu. [2]

1.4 Průřez třísky a jeho rozměry

Průřez třísky je určen jako vrstva obráběného materiálu, která má být odebrána působením ostří nástroje. Plocha průřezu třísky je označována jako A_D a je určena posuvem f a hloubkou řezu a_p podle vzorce: [4]

$$A_D = a_p \cdot f \cdot \sin \varphi \text{ [mm}^2\text{]} \quad 1.4.1$$

Kde: A_D [mm²] - plocha průřezu třísky,

a_p [mm] – hloubka řezu,

φ [°] - úhel nastavení ostří na směr hlavního pohybu

V případě, kdy bude úhel nastavení hlavního ostří $\kappa_r = 0^\circ$, bude $\varphi = 90^\circ$ a pro výpočet se použije vztah: [4]

$$A_D = a_p \cdot f = h_D \cdot b_D \text{ [mm}^2\text{]} \quad 1.4.2$$

Kde: h_D [mm] - jmenovitá tloušťka třísky,

b_D [mm] - jmenovitá šířka třísky.

Vznik průřezu třísky je zobrazen na obrázku 16. Ze závislosti řezné složky síly na průřezu třísky je následně možné spočítat velikost měrného řezného odporu.

Jmenovitou tloušťku a jmenovitou šířku třísky je možno vypočítat ze vztahů: [34]

$$b_D = \frac{a_p}{\kappa_r} \text{ [mm]} \quad 1.4.3$$

$$h_D = f \cdot \sin \kappa_r \text{ [mm]} \quad 1.4.4$$

2 Dynamické zatížení a silové poměry při obrábění

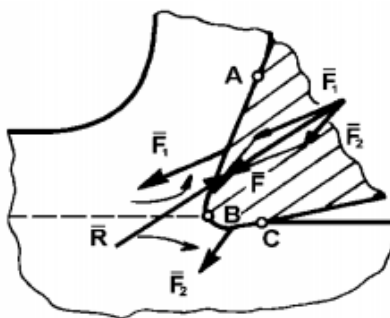
Obrábění materiálu je velmi složitý dynamický proces, při němž dochází působením řezného klínu nástroje k oddělení materiálu ve formě třísky z povrchu obráběného materiálu. Mechanismus tvorby třísky prokazuje, že působení řezného klínu na obráběný materiál vyvolává v materiálu stav napjatosti. Tento proces je doprovázen menšími nebo většími elastickými i plastickými deformacemi, ale také silovými poměry. Zkoumání silových poměrů v průběhu procesu obrábění umožňuje získat přehled o mechanickém namáhání soustavy S-N-O, její pevnosti a tuhosti, stability řezného procesu. Znalost silových poměrů při obrábění může být důležitá z hlediska hodnocení obrobitelnosti materiálu, trvanlivosti a životnosti nástrojů, vlivu na integritu obrobeného povrchu. [31]

Silové poměry doprovázející proces řezání, je možno rozložit na sílu třísky působící kolmo na čelo nástroje F_n a sílu tření F_t působící na stykové ploše nástroje s odřezávanou vrstvou materiálu. Obě tyto složky lze shrnout do výsledné síly obrábění (řezání) F . Síla řezání je při obrábění obzvlášť významnou veličinou, kterou je nutno brát jako časově proměnný a dynamický jev. Při obrábění se v závislosti na čase mění její okamžitá velikost F_{ok} (\pm až 20 %), a to i při obrábění za konstantních řezných podmínek. Je to způsobeno zejména rozptylem mechanických vlastností a nehomogenitou obráběného materiálu a mechanikou tvorby třísky. [8, 31]

Působení výsledné síly řezání F vyvolává v materiálu stav napjatosti, který způsobuje deformační (řezný) odpor R , který síla řezání musí při procesu obrábění neustále překonávat. Síla řezání F je celková síla, kterou působí nástroj na obrobek. Naopak, řezný odpor R , někdy označovaný i jako F' , je silové působení obrobku na nástroj. Pro podmínku rovnováhy viz obr. 2.1 platí: [32]

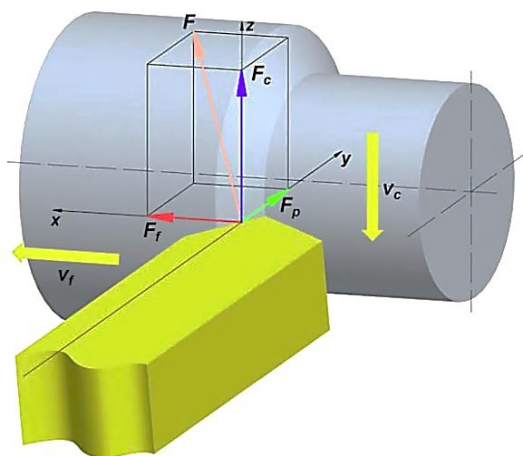
$$F = -R [N]$$

2.1



Obr. 2.1 Výsledná síla řezání a její rozklad při soustružení [10]

Při obrábění vznikají obrovské síly tlakové, ale i smykové, které působí ve zcela rozdílných směrech, proto se síla řezání rozkládá do složek, na jejichž základě je možné určit velikost a směr výsledného silového působení. Pokud hovoříme o celkové řezné síle a jednotlivých složkách řezné síly, je možné celkovou řeznou sílu rozložit v souvislosti s aspekty hlavního a vedlejšího řezného pohybu na aktivní složku řezání F_t a pasivní složku řezání F_p . Aktivní složka řezné síly lze dále rozložit na řeznou složku síly F_c a posuvovou složku síly F_f . Pasivní složka síly se už dále nerozkládá a označuje se F_p , viz obr. 2.2. [31]



Obr. 2.2 Schéma rozložení složek řezných sil [8]

Největší význam má řezná (tangenciální) složka síly F_c , ta tvoří základ pro stanovení omezujících podmínek při volbě řezných parametrů. Velikost tangenciální složky síly je z velké části ovlivněna kontaktem a velikostí tření mezi obrobkem a nástrojem resp. mezi třískou a čelem nástroje, utvářením a efektem lámání třísky. Působí ve směru hlavního řezného pohybu a určuje potřebný výkon elektromotoru, ale i celkového množství tepla, které se v zóně řezání vytvoří. Tato síla je největší a podílí se na celkovém příkonu obvykle asi 99 %. [32, 33, 6]

Pasivní (radiální) složka síly F_p působí radiálně ve směru, který je kolmý na obráběnou plochu. Při podélném soustružení (působí v rovině zadní) je funkcí přísluvu nebo specifického tlaku, který namáhá tuhost soustavy S-N-O. [32,33]

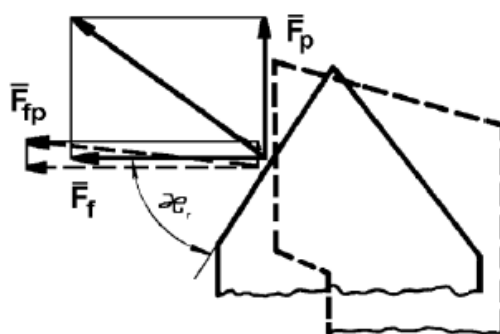
Velikost pasivní síly je asi 25 % velikosti řezné síly a působí ve směru nejmenší tuhosti obráběcí soustavy. To výrazně ovlivňuje: [6]

- přesnost obrobené plochy, především se zřetelem na elastickou deformaci obrobku, respektive nástroje,
- chvění při obrábění – náchylnost na vznik chvění se zvyšuje se snižující se tuhostí soustavy

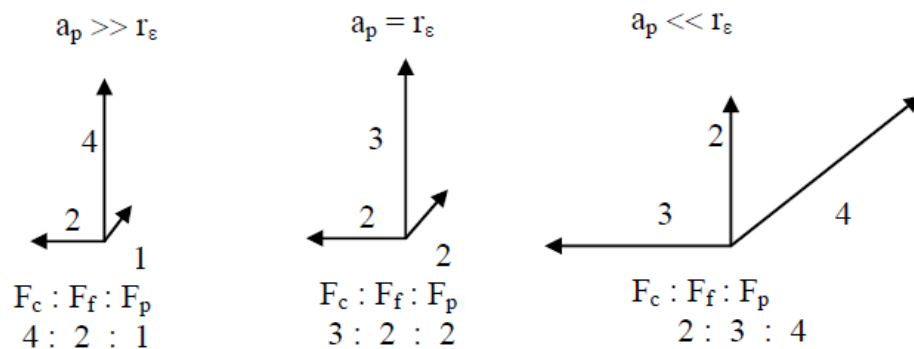
Posuvová (axiální) složka síly F_f působí ve stejném směru jako posuv nástroje a směr osy obrábění. Je kolmá na směr tangenciální i radiální složky a využívá se na dimenzování posuvových mechanismů. [32, 33]

Velikost této síly je obvykle 40 – 50 % velikosti řezné síly. Na celkovém příkonu na obrábění se však podílí jen velmi málo, s ohledem na to, že rychlost posuvu je ve srovnání s řeznou rychlostí velmi malá. Tato síla působí ve směru největší tuhosti obráběcí soustavy. [6]

Poměr velikosti jednotlivých složek řezné síly je dán především zvolenou technologií obrábění, řeznými podmínkami, řezným prostředím, geometrií a materiálem řezného nástroje. Např. při soustružení je poměrně často používaný poměr sil roven přibližně $F_c : F_p : F_f = 1 : 0,4 : 0,25$ (platí pro $\kappa_r = 45^\circ$). S rostoucím, nebo klesajícím úhlem nastavení se mění vektory složek řezné síly F_p a F_f a jejich výslednice viz obr. 2.3. Vliv na jednotlivé složky síly má nejen úhel nastavení hlavního ostří, ale také úhel čela, s jehož klesající hodnotou rostou hlavně složky síly F_p a F_f . Opačný dopad na velikost výsledné síly řezání má oproti úhlu nastavení hlavního ostří κ_r poloměr špičky nástroje r_ϵ . Ten mění poměr jednotlivých složek v závislosti na hloubce odebíraného materiálu, viz obr. 2.4. [8, 32]



Obr. 2.3 Vliv úhlu κ_r na velikost vektoru pasivní a posuvové složky síly [1]



Obr. 2.4 Teoretický vliv poloměru špičky nástroje na poměr složek síly řezání [1]

Výpočet vybraných složek síly řezání je možné provést na základě empirických vztahů. Pro podélné soustružení válcové plochy se uvádí mocninné vztahy: [6]

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{fc}} \text{ [N]} \quad 2.2$$

$$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{ff}} \text{ [N]} \quad 2.3$$

$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{x_{Fp}} \cdot f^{y_{fp}} \text{ [N]} \quad 2.4$$

Kde: C_{Fc} , C_{Ff} , C_{Fp} - empirické konstanty

x_{Fc} , x_{Ff} , x_{Fp} , y_{fc} , y_{ff} , y_{fp} - empirické exponenty

Pro vzájemný vztah mezi celkovou řeznou silou a jejími složkami platí vztah: [6]

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \text{ [N]} \quad 2.5$$

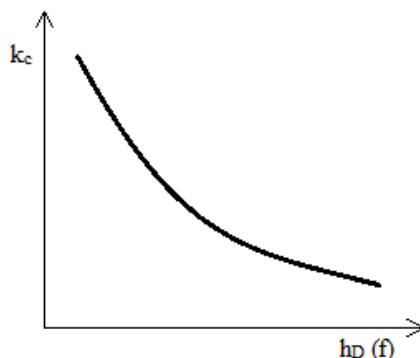
S rostoucím posuvem a hloubkou řezu, roste při soustružení složka řezné síly řezání F_c , obdobně to platí i pro složky F_p a F_f . Mimo zmíněné řezné podmínky ovlivňuje řezná rychlost v podstatě všechny tři složky stejně. Její vliv na velikost řezné složky síly je srovnatelný s jejím vlivem na měrný řezný odpor. Závislost řezné rychlosti na měrném řezném odporu má za předpokladu, že se vlivem teploty nemění mechanické vlastnosti obráběného materiálu, a že se netvoří nárůstek, klesající tendenci. S rostoucí řeznou rychlostí měrný řezný odpor klesá. Tato závislost souvisí se změnou velikosti oblasti primární plastické deformace vlivem rostoucí řezné rychlosti. Bylo prokázáno, že s rostoucí řeznou rychlostí se měrná řezná síla zmenšuje, a to až do minima při řezné rychlosti charakteristické pro daný obráběný materiál, poté má síla řezání tendenci růstu společně se zvyšující se řeznou rychlostí. Dosažením určité řezné rychlosti by v materiálech 1.1191 a 2.4856 mělo dojít k tepelnému odpevňování, nárůstu a zrychlenému pohybu dislokací ve struktuře materiálu, náhlé změně metalurgických a mechanických vlastností vznikající třísky. Obráběný materiál a třísky už nekladou takový odpor proti řeznému klínu nástroje a dochází k poklesu řezných sil. [29]

Měrná řezná síla (měrný řezný odpor) je vyjádřena řeznou silou, vztaženou na jednotku plochy řezu a je definována jako poměr řezné složky F_c a plochy jmenovitého průřezu třísky A_D . [8]

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \text{ [N.mm}^{-2}\text{]} \quad 2.6$$

Měrný řezný odpor se výrazně mění v závislosti na obráběném materiálu, ale mění se také s posuvem, řeznou rychlostí, úhlem řezu apod. Významná je změna měrného

řezného odporu s posuvem f , respektive s tloušťkou odřezávané vrstvy h_D viz. Obr. 2.5. [6]



Obr. 2.5 Závislost měrného řezného odporu na posuvu, respektive tloušťce odřezávané vrstvy [6]

Například pro posuv platí vztah: [6]

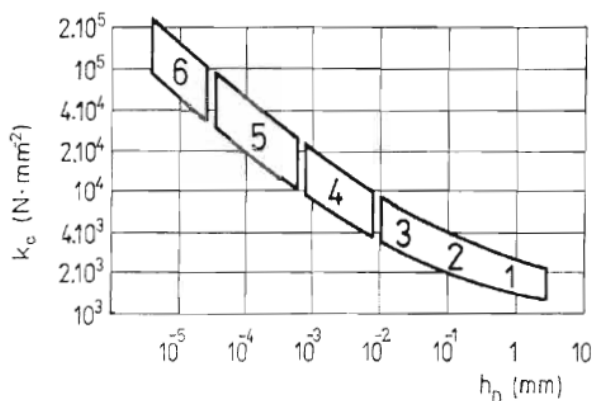
$$k_c = \frac{C_{kc}}{f^{u_{kc}}} [N \cdot mm^{-2}] \quad 2.7$$

Kde: f – posuv [mm]

C_{kc} , u_{kc} – empirické konstanty

Hodnota exponentu u_{kc} se obvykle pohybuje v rozsahu 0,15 – 0,30. Nejčastěji nabývá hodnoty 0,25 tuto hodnotu je možno uvažovat při praktických výpočtech. [6]

U různých technologií obrábění jsou použity různé rozsahy posuvů, z toho vyplývají různé rozsahy měrné řezné síly, což je možno vidět na obrázku 2.6. Čím je technologie přesnější, tím menší tloušťky odřezávané vrstvy se používají a tím je také větší měrná řezná síla. [6]



Obr. 2.6 Vliv různých technologií na měrnou řeznou sílu

(1- soustružení, 2 – vrtání, 3 – frézování, 4 – vystružování, 5 – broušení, 6 – lapování) [6]

Měrná řezná síla se dá také vyjádřit jako násobek pevnosti v tahu R_m : [6]

$$k_c = C_k \cdot R_m [N \cdot mm^{-2}] \quad 2.8$$

Kde: R_m - pevnost v tahu [$N \cdot mm^{-2}$, (MPa)]

C_k - konstanta

Velikost konstanty C_k pro různé technologie obrábění se pohybuje v rozmezí, které je možno vidět v tabulce 2.1.

Tab. 2.1 Velikost konstanty c_k [6]

technologie obrábění	c_k
soustružení	3 až 5
vrtání	3 až 6
frézování	4 až 10
broušení	20 až 35

Pomocí měrného řezného odporu se dá spočítat velikost řezné síly: [6]

$$F_c = k_c \cdot A_D = k_c \cdot h_D \cdot b_D [N] \quad 2.9$$

Řezný výkon respektive příkon potřebný pro řezání je dán vztahem: [6]

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60} \quad 2.10$$

P_c – řezný výkon [W]

F_c – řezná síla [N]

v_c – řezná rychlost [$m \cdot min^{-1}$]

2.1 Měření složek síly řezání

Odebrání materiálu ve formě třísky z povrchu obráběného materiálu dochází za působení síly řezání, vyvolané ostřím nástroje. Identifikace a analýza působení sil probíhá za účelem optimalizace technologických podmínek obráběcího procesu. Přitom je však nutno vycházet z podmínek energetické rovnováhy, respektive z podmínek rovnováhy sil. Z experimentálního studia silových poměrů při obrábění jde v podstatě o přímé nebo nepřímé stanovení síly řezání, složek síly řezání a momentů působících při různých pracovních podmínkách. Přímé měření jednotlivých složek síly řezání a jejich momentů je založeno na měření deformací a namáhání soustavy S-N-O prostřednictvím dynamometrů. [8]

Při měření je řezný nástroj upnut na snímací zařízení – dynamometr, ten při zatěžování reaguje na vznik složek síly řezání a momentů vytvořením elektrického signálu

odpovídajícímu velikosti působící síly. Dynamometry mají vysoké požadavky na citlivost, která je dána jako poměr elektrického výstupu na jednotku silového výstupu, tuhost konstrukce snímače, zaručující aby se jednotlivé složky síly řezání vzájemně neovlivňovaly, vysokou frekvenční odezvu, linearitu a nízkou odchylku. Použití dynamometrů při obrábění zjišťuje přesné podmínky, vznikající na řezném nástroji za dynamických situací, to je neocenitelné při hodnocení obrobitelnosti materiálu. V průběhu měření, by měl dynamometr zaručit nezávislost měřicí veličiny na provozních vlastnostech přístroje, schopnost měřit sledovanou veličinu ve zvoleném rozsahu s maximální přesností, stálost naměřených hodnot v čase a jejich reprodukovatelnost. Z hlediska konstrukčního uspořádání a použité metody měření lze dynamometry rozdělit na: [8]

- S pružným členem (mechanický, pneumatický, indukční, kapacitní, elektrický),
- Bez pružného členu (hydraulický, uhlíkový, piezoelektrický).

Podle metody obrábění, na kterou jsou dynamometrická měřidla aplikována, se rozeznávají dynamometry pro operace soustružení, frézování, vrtání, broušení atd. Dále dle počtu měřených složek silového zatížení je lze rozdělit na jednosložkové a vícesložkové umožňující měření více složek sil i krouticích momentů. [8]

Pro stanovení silových poměrů v soustavě S-N-O a jednotlivých složek síly řezání bude v průběhu experimentálního obrábění materiálů 1.1191 a 2.4856 použit tříoskový stacionární dynamometr s označením 9129AA od společnosti KISTLER viz obr. 2.7. [9]



Obr. 2.7 Tříoskový stacionární dynamometr 9129AA a zesilovač 5070A [9]

Piezoelektrické dynamometry patří mezi nejpoužívanější moderní senzory silového zatížení s širokým spektrem využití. Využívají pro snímání deformace piezoelektrického jevu, který je charakterizován vznikem elektrického náboje na povrchu některých krystalů při mechanickém zatížení. Nejpoužívanější piezoelektrický materiál je křemen, dále materiály na bázi titaničitanu barnatého, Siegnettovy soli a další. [10]

3 Návrh metodiky experimentální práce

Experimentální část diplomové práce řeší problematiku závislosti průřezu odebírané vrstvy materiálu a jeho vlivu na měrný řezný odpor. Experiment byl proveden na CNC soustruhu od firmy DMG MORI s označením NLX2500MC/700. Obrábění bylo realizováno břitovými destičkami CNMG 120408 – SM a CNMX 1204A2 – SM. Jako materiál k obrábění byla zvolena etalonová ocel 1.1191 a žáruvzdorná niklová slitina 2.4856. Experiment byl řešen v laboratořích katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie VŠB – TU v Ostravě.

V tomto experimentu bylo nejprve nutno navrhnout dva průřezy třísky pro každou břitovou destičku tak, aby se co nejvíce blížily stejným hodnotám. Tohoto je možno dosáhnout dle vzorce pro výpočet průřezu třísky, kde byly vypočteny nejprve jmenovité tloušťky h_D třísky při dvou různých posuvech f , dále jmenovité šířky b_D třísky při dvou různých hloubkách řezu a_p .

Po získání a zvolení vhodných řezných podmínek pro obě břitové destičky proběhlo měření průběhu sil pomocí dynamometru od firmy KISTLER pro materiály 1.1191 a 2.4856. Nejprve byl experiment proveden na obrobku materiálu 1.1191 vyměnitelnou břitovou destičkou CNMG 120408 – SM, byl naměřen průběh sil a následně byla destička vyjmuta z držáku a pod mikroskopem pořízena fotka opotřebení na čele a na hřbetu. Totéž se provádělo na materiálu 1.1191 vyměnitelnou břitovou destičkou CNMX 1204A2 – SM a stejným postupem pro obě destičky byl proveden experiment pro materiál 2.4856. Z naměřených hodnot byl dále dopočítán měrný řezný odpor k_c .

3.1 Použitý obráběný materiál

V experimentu byly použity dva druhy materiálů, a to uhlíková ocel 1.1191 a niklová slitina 2.4856. Pro experiment bylo zapotřebí zvolit dva odlišné materiály. Ocel 1.1191 byla zvolena z toho důvodu, že slouží jako etalonový materiál a bude dobře obrobitelná, na rozdíl od niklové slitiny 2.4856, která je pro svou vysokou houževnatost hůře obrobitelná. Tyto dva druhy byly vybrány proto, aby byla v experimentu vidět jejich odlišnost.

- **Ocel 1.1191**

Jedná se o uhlíkovou ocel určenou k zušlechťování a povrchovému kalení (ČSN 41 2050). Výchozí stav normalizačně žíhaný. Tato ocel je referenčním materiálem pro třídu oceli. Dle normy ČSN je tato ocel značena jako 12 050.1.

- **Chemické složení oceli 1.1191**

Tab. 3.1 Chemické složení oceli 1.1191

obsah prvků	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
[hm. %]	0,42 0,50	0,50 0,80	0,17 0,37	max 0,25	max 0,30	max 0,30	max 0,040	max 0,040

- **Mechanické vlastnosti 1.1191**

Tab. 3.2 Mechanické vlastnosti oceli 1.1191

Mez kluzu Rp0,2	min 325 MPa
Mez pevnosti Rm	min. 540 MPa
Tažnost A5	min. 17 %
Tvrdost	max. 225 HB
Modul pružnosti v tahu E	211 GPa
Modul pružnosti ve smyku G	79 GPa

Tato ocel je vhodná na hřídele těžních strojů, turbokompresorů, karuselů, na větší ozubená kola, šneky, ojnice, pístnice, plunžry, písty kompresorů, čepy, šrouby, dopravní válečky, lamely spojek, zarážky, kolíky, spojovací součásti, posouvací vidlice, držáky, vrtací tyče, frézovací trny.

- **Slitina 2.4856**

Je to slitina niklu a chrómu s příměsí molybdenu a niobu. Vyznačuje se výbornými mechanickými i fyzikálními vlastnostmi, a to jak při nízkých, tak i za velmi vysokých teplot. Zpevňující účinek molybdenu a niklu způsobuje, že má slitina vyšší pevnost a odolnost proti procesu oxidace. Chemické složení na bázi Ni-Cr a jednotlivé fáze ovlivňují mechanické vlastnosti slitiny, žáruvzdornost a odolnost proti korozi, ale i oblasti použití. Tato slitina je taky známá pod názvem Inconel Alloy 625. [8, 26]

- **Chemické složení slitiny 2.4856**

Tab. 3.3 Chemické složení slitiny 2.4856 [26]

obsah prvků	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	Si
[hm. %]	min. 58	20 - 23	max. 5	8 - 10	3 - 4	max. 0,5
obsah prvků	P	Ti	Al	Mn	C	Co
[hm. %]	1,5	max. 0,4	max. 0,4	max. 0,5	max. 0,1	max. 1

- **Mechanické vlastnosti 2.4856**

Tab. 3.4 Mechanické vlastnosti slitiny 2.4856

Mez kluzu $R_{p0,2}$	min. 415 Mpa
Mez pevnosti R_m	820 - 1050
Tažnost A	min. 30 %
Tvrlost	max. 240 HB

Tato slitina se běžně používá pro součásti, které jsou dlouhou dobu vystaveny nepříznivým vlivům prostředí, ať už ve spalovacích turbínách, na mořském dně, nebo v leteckých motorech. Takovéto součásti mohou například být komíny a kouřovody v odsiřovacích zařízeních nebo zařízení pro výrobu kyseliny sírové, fosforečné, dusičné, chlorovodíkové a fluorovodíkové i pro organické povlaky. [8, 26]

3.2 Obráběcí stroj

Pro obrábění byl použit horizontální CNC soustruh od firmy DMG MORI s označením NLX2500MC/700, viz obr. 3.1. Konstrukce zvoleného CNC soustruhu splňuje všechny požadavky a nároky, které jsou spojeny s obráběním kovových materiálů i pro ty, které se dají hůře obrábět a zajišťuje maximální stabilitu rychlosti při obrábění a potřebnou tuhost. Tuhost stroje má přímý vliv na dosahovanou přesnost obrobených ploch, ale také hlavně na výkon obrábění. CNC soustruh použitý pro experimentální obrábění materiálu je umístěn v laboratořích na katedře obrábění, montáže a strojírenské metrologie, proto veškeré experimentální obrábění tohoto materiálu proběhlo na Fakultě strojní VŠB – TU v Ostravě.

Tab. 3.5 Základní parametry soustružnického centra DMG MORI NLX 2500 MC/700 [17]

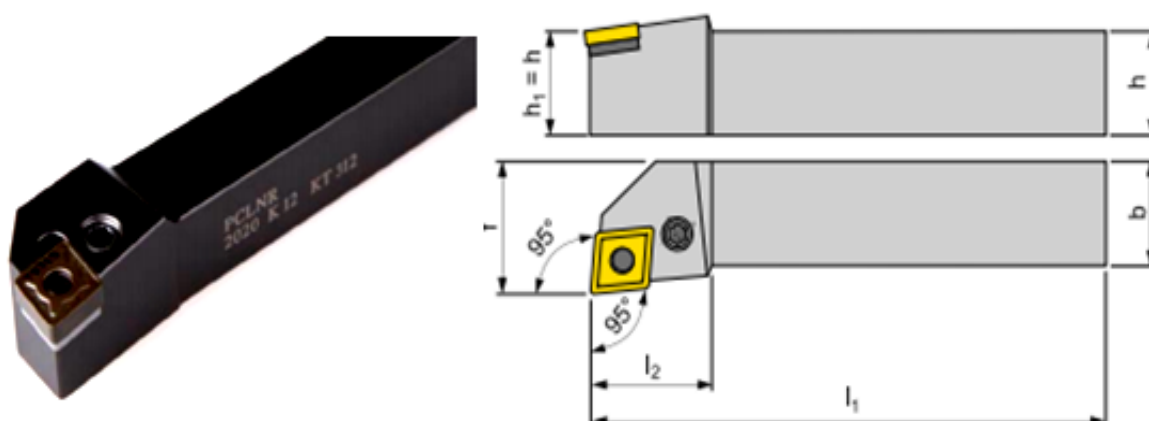
pracovní rozsah	Oběžný průměr nad ložem	787 mm
	Největší soustružená délka	705 mm
	Největší průměr obrobku	366 mm
	Rozsah délky v ose Z	795 mm
	Rozsah délky v ose X	260 mm
vřeteno	Rozsah otáček	0 - 4000 min^{-1}
	Výkon vřetene	18,5 kW
Nástroje	Počet nástrojů	12
	Počet poháněných nástrojů	3
	Výkon poháněných nástrojů	5,5 kW
Posuvové pohony	Rychloposuv	30000 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$



Obr. 3.1 CNC soustruh NLX2500MC/700

3.3 Použitý řezný nástroj

Pro soustružení materiálu obrobku byl použit nožový držák PCLNR 2525 M12, který zajišťuje stabilní a pevné upnutí vyměnitelných břitových destiček typu CNMG 120408 – SM i CNMX 1204A2 - SM. Destičky jsou upnuty v držáku pomocí systému P, který bylo možno vidět na obrázku 1.4. Nožový držák na upínání břitových destiček, má zápornou geometrii břitu $\lambda_s = -6^\circ$, $\gamma_o = -6^\circ$. Tento typ držáku se nachází na obrázku 3.2. [23]



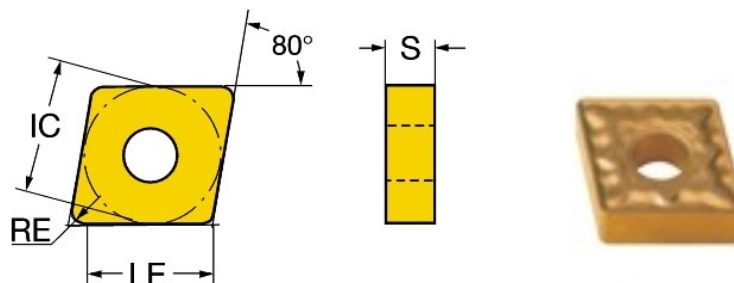
Obr. 3.2 Nožový držák PCLNR 2525 M12 [21]

Tab. 3.6 Rozměry PCLNR 2525 M12 [23]

$h=h_1$ [mm]	b [mm]	f [mm]	l_1 [mm]	l_{2max} [mm]
25	25	32	150	36


3.4 Použité břitové destičky

Pro obrábění byly použity vyměnitelné břitové destičky CNMG 120408 – SM. Tento typ destiček je určen pro dokončovací a polohrubovací soustružení. Díky negativní geometrii je možno destičku otočit má tedy 4 břity.



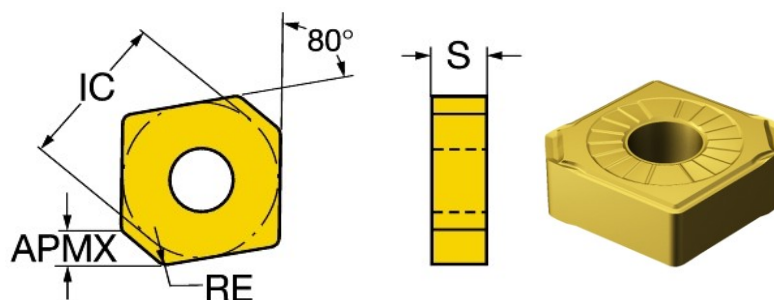
Obr. 3.3 CNMG 120408 – SM [29]

Tab. 9 Vyměnitelná břitová destička – její vybrané parametry [29]

	Délka ostří	Rádus špičky	Posuv na otáčku		Hloubka řezu	
	[mm]	[mm]	[mm]		[mm]	
	l_0	r_ϵ	f_{\min}	f_{\max}	$a_{p\min}$	$a_{p\max}$
CNMG 120408 – SM	12	0,8	0,1	0,35	0,2	3

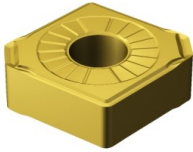
Tyto destičky s utvařečem SM se vyrábí pro soustružení těžko obrobitelných slitin. Používají se pro hrubování, ale také pro dokončovací operace, jak pro nepřetržitý tak pro přerušovaný řez. Nová geometrie utvařeče zajišťuje snadnou optimalizaci, lepší produktivitu a prvotřídní proces bezpečnosti, aby se splňovaly nároky na kvalitu povrchu.

Jako další vyměnitelná břitová destička při tomto experimentu byl použit typ CNMX 1204A2 – SM. Tato destička má taktéž 4 břity, je určena pro soustružení, pro operaci hrubování.



Obr. 3.4 CNMX 1204A2 – SM [27]

Tab. 3.7 Vyměnitelná břitová destička – její vybrané parametry [27]

	Délka ostří	Rádus špičky	Posuv na otáčku		Hloubka řezu	
	[mm]	[mm]	[mm]		[mm]	
	l_0	r_ϵ	f_{\min}	f_{\max}	$a_{p\min}$	$a_{p\max}$
CNMX 1204A2 – SM	12	0,8	0,13	0,35	0,5	2,5

3.5 Řezné podmínky

Pro vyměnitelné břitové destičky byl navržen posuv f a hloubka řezu a_p tak, aby jmenovitý průřez třísky byl přibližně stejný při dvou různých hodnotách posuvu f a hloubce řezu a_p . Pro ocel 1.1191 byl zvolen jiný průřez třísky jako pro slitinu 2.4856 z důvodu doporučených řezných podmínek daných výrobcem VBD. Výpočet jmenovitého průřezu třísky byl realizován dle těchto vztahů: [5]


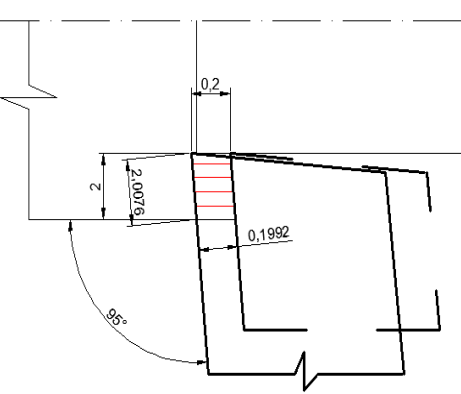
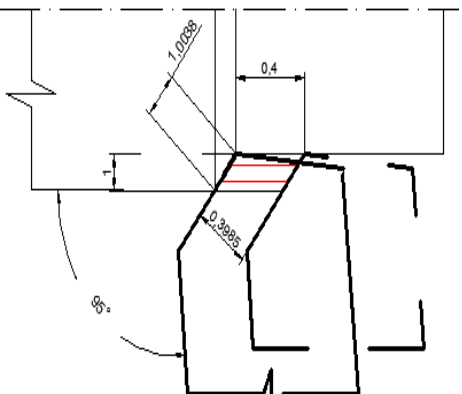
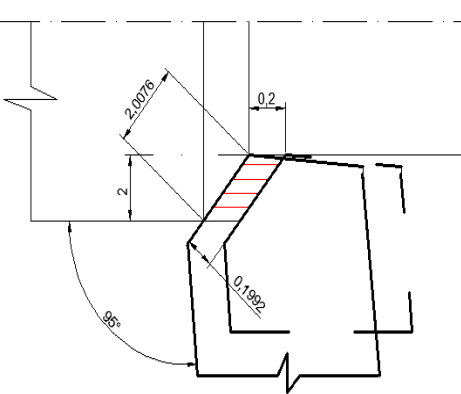
$$h_D = f \cdot \sin \kappa_r \text{ [mm]} \quad 3.6.1$$

$$b_D = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \text{ [mm]} \quad 3.6.2$$

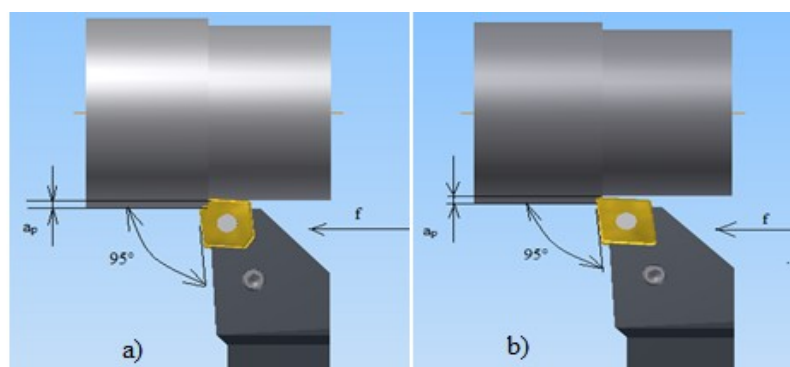
$$A_D = a_p \cdot f = h_D \cdot b_D \text{ [mm}^2\text{]} \quad 3.6.3$$

Zvolené řezné podmínky a také schéma úběru třísky pro materiály 1.1191 a 2.4856 je možno vidět v tabulkách 3.8 a 3.9.

Tab. 3.8 Řezné podmínky pro ocel 1.1191

1.1191	CNMG 120408 - SM			CNMX 1204A2 - SM		
	$a_p=1 \text{ mm}$	$f=0,4 \text{ mm}$	$v_c=180 \text{ m.min}^{-1}$	$a_p=2 \text{ mm}$	$f=0,2 \text{ mm}$	$v_c=180 \text{ m.min}^{-1}$
						
						

$A_D=0,4 \text{ mm}^2$



Obr. 3.5 Úběr třísky

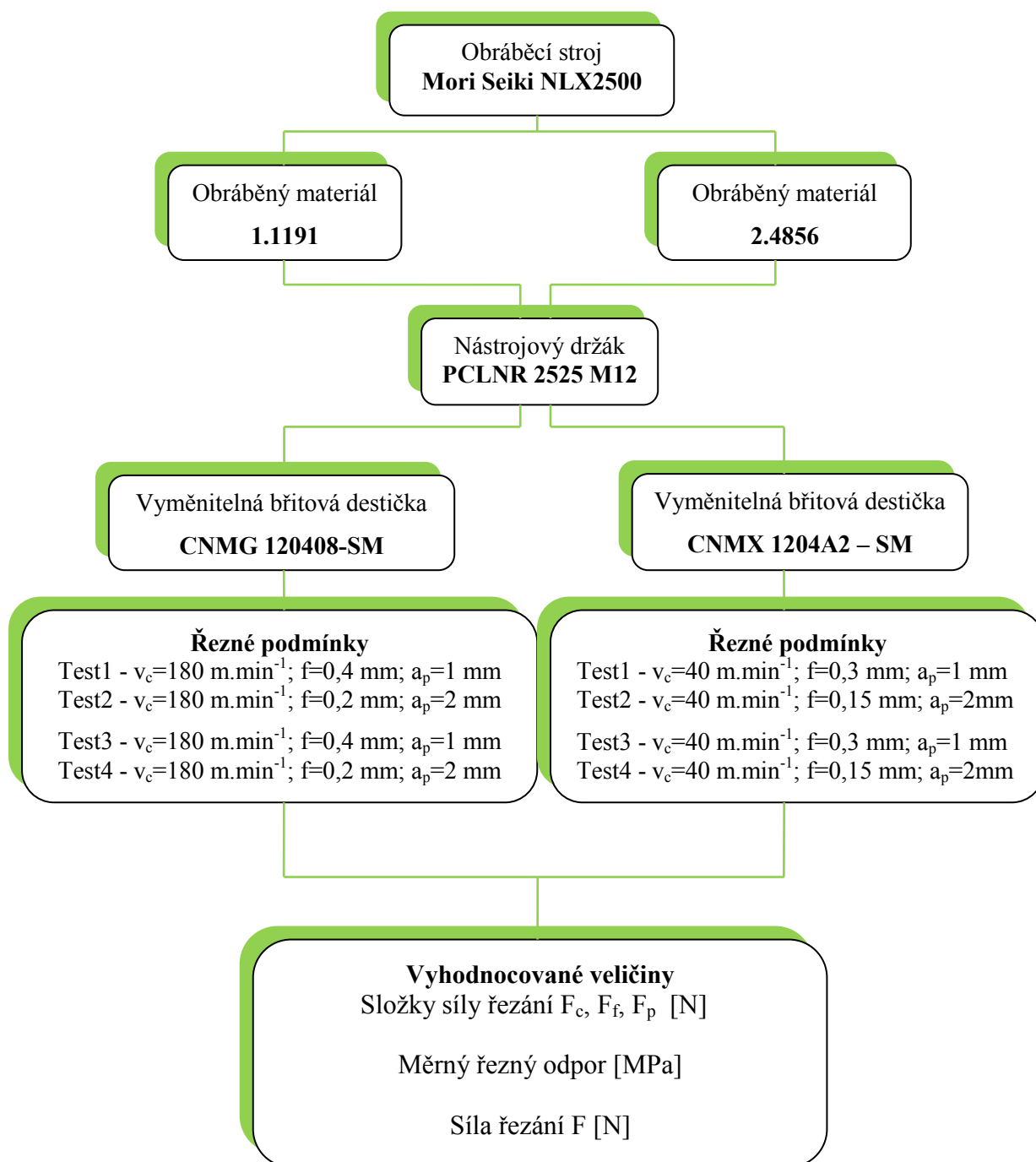
a) VBD CNMX 1204A2 – SM, b) VBD CNMG 120408 - SM

Tab. 3.9 Řezné podmínky pro slitinu 2.4856

2.4856	CNMG 120408 - SM			CNMX 1204A2 - SM		
	$a_p=1 \text{ mm}$	$f=0,3 \text{ mm}$	$v_c=40 \text{ m.min}^{-1}$	$a_p=2 \text{ mm}$	$f=0,15 \text{ mm}$	$v_c=40 \text{ m.min}^{-1}$
	CNMG 120408 - SM			CNMX 1204A2 - SM		
$A_D=0,3 \text{ mm}^2$	$a_p=1 \text{ mm}$	$f=0,3 \text{ mm}$	$v_c=40 \text{ m.min}^{-1}$	$a_p=2 \text{ mm}$	$f=0,15 \text{ mm}$	$v_c=40 \text{ m.min}^{-1}$

3.5.1 Blokové schéma navrženého experimentu

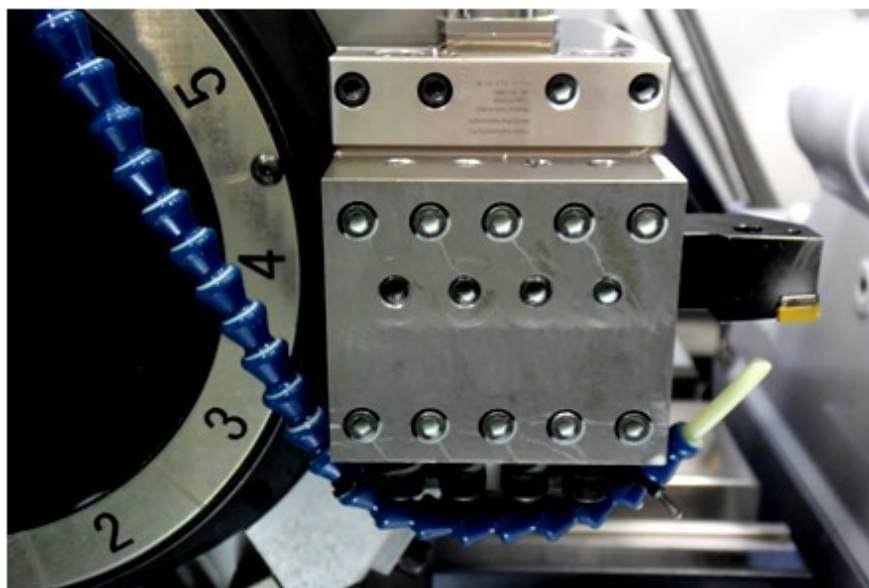
Pro grafické znázornění kroků v experimentu bylo vytvořeno blokové schéma, viz obr. 3.6.



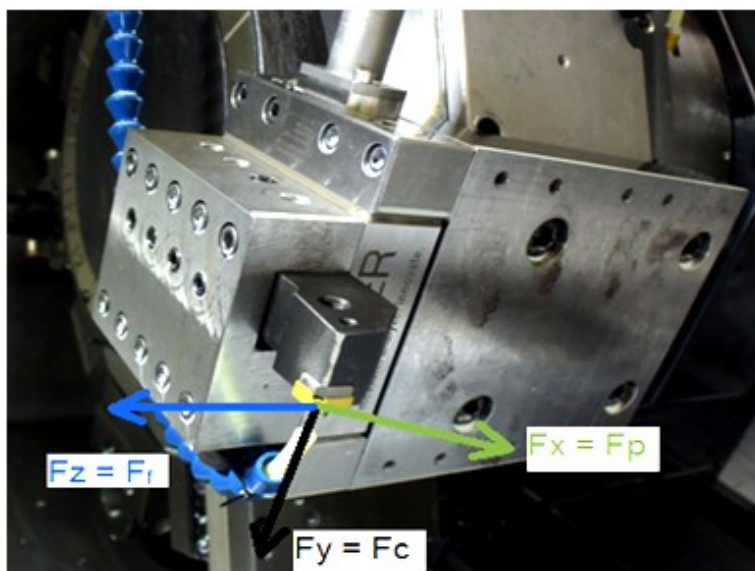
Obr. 3.6 Schéma navrženého experimentu

4 Realizace experimentu

Do speciálního držáku na revolverovou hlavu stroje NLX2500MC/700_M730BM byl připevněn dynamometr 9129AA Kistler a do něj vložen nástrojový držák PCLNR 2525 M12, do kterého se upínala vyměnitelná břitová destička CNMG 120408 – SM nebo CNMX 1204A2 – SM. Pomocí optického kabelu připojeného k základní jednotce dynamometru, byly naměřené hodnoty přivedeny do zesilovacího zařízení KISTLER 5070A a transportovány v podobě milivoltaického napětí do převodníku KISTLER 5697. Zpracování výsledků silového zatížení proběhlo pomocí PC sestavy a nainstalovaného softwaru DynoWare taktéž od společnosti KISTLER. Do místa řezu byla přiváděna chladicí kapalina, jelikož bylo zapotřebí intenzivního chlazení. Tuto soustavu je možno vidět na obrázku 4.1. Měření složek sil bylo prováděno na délce 50 mm. Samotné měření probíhalo měřením tří na sebe kolmých sil F_x , F_y , F_z , kterým byly dle nastavení dynamometru přiřazeny jednotlivé složky řezné síly F_c , F_p , F_f , viz obr. 4.2. Každé měření probíhalo vždy s novou řeznou hranou vyměnitelné břitové destičky.

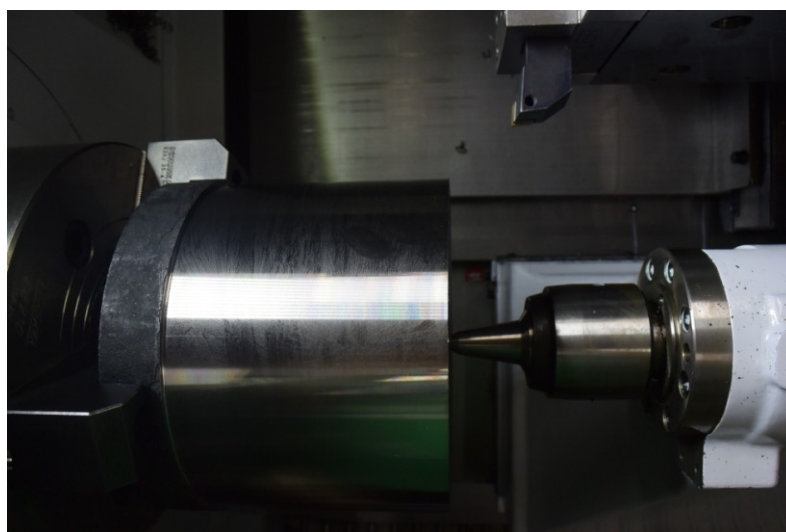


Obr. 4.1 Dynamometr + přívod chladicí kapaliny

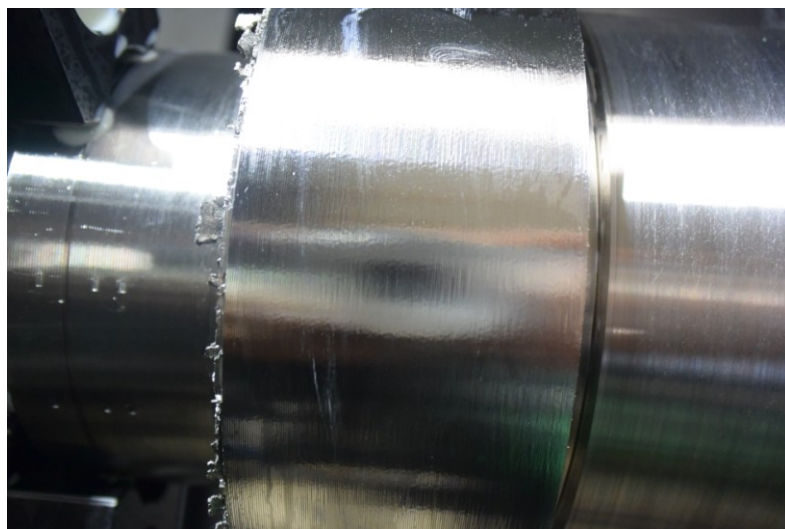


*Obr. 4.2 Upnutí dynamometru na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500 MC/700
se zaznačením směru měření složek sil*

Prvním zkoumaným materiálem v experimentu, byla ocel 1.1191, viz obr. 4.3. Jako další materiál, na kterém byl experiment proveden, byla slitina 2.4856, viz Obr. 4.4.



Obr. 4.3 Ocel 1.1191



Obr. 4.4 Slitina 2.4856

Experiment byl realizován nejprve pomocí destičky CNMG 120408 – SM. Jako řezné podmínky byly nastaveny, řezná rychlost $v_c=180 \text{ m.min}^{-1}$, posuv $f=0,4 \text{ mm}$ a hloubka řezu $a_p=1 \text{ mm}$. V průběhu obrábění požadované vzdálenosti, byl dynamometrem naměřen průběh sil, po naměření byla vyměnitelná břitová destička vyjmuta a následně bylo pomocí mikroskopu zkoumáno opotřebení na čele a hřbetu této VBD.

Tímto způsobem bylo provedeno měření pro další řezné podmínky VBD CNMG 120408 – SM a CNMX 1204A2 – SM. Řezné podmínky, podle kterých probíhalo měření experimentu, nalezneme v tabulce 4.1.

Tab. 4.1 Řezné podmínky

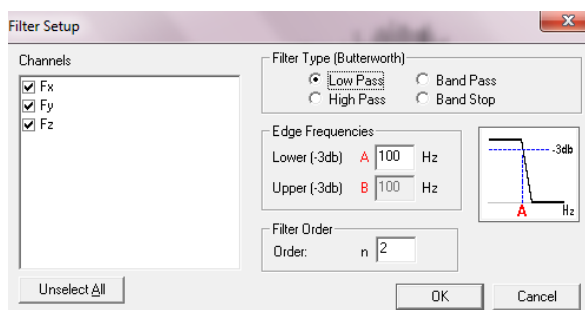
Mat. 1.1191	CNMG 120408 -SM	$a_p=1 \text{ mm}$	$f=0,4 \text{ mm}$	$v_c=180 \text{ m.min}^{-1}$	test 1
	CNMG 120408 -SM	$a_p=2 \text{ mm}$	$f=0,2 \text{ mm}$	$v_c=180 \text{ m.min}^{-1}$	test 2
	CNMX 1204A2 - SM	$a_p=1 \text{ mm}$	$f=0,4 \text{ mm}$	$v_c=180 \text{ m.min}^{-1}$	test 3
	CNMX 1204A2 - SM	$a_p=2 \text{ mm}$	$f=0,2 \text{ mm}$	$v_c=180 \text{ m.min}^{-1}$	test 4
Mat. 2.4856	CNMG 120408 -SM	$a_p=1 \text{ mm}$	$f=0,3 \text{ mm}$	$v_c=40 \text{ m.min}^{-1}$	test 1
	CNMG 120408 -SM	$a_p=2 \text{ mm}$	$f=0,15 \text{ mm}$	$v_c=40 \text{ m.min}^{-1}$	test 2
	CNMX 1204A2 - SM	$a_p=1 \text{ mm}$	$f=0,3 \text{ mm}$	$v_c=40 \text{ m.min}^{-1}$	test 3
	CNMG 1204A2 -SM	$a_p=2 \text{ mm}$	$f=0,15 \text{ mm}$	$v_c=40 \text{ m.min}^{-1}$	test 4

5 Zpracování naměřených dat

Při podélném vnějším soustružení bylo naměřeno velké množství dat obsahujících informace o hodnotách sil F_x (F_p), F_y (F_c) a F_z (F_f). Tyto hodnoty složek sil byly převedeny programem DynoWare do grafů, nebo je bylo možné exportovat do textových souborů a následně tyto data zpracovat pomocí programu MS Excel, kde je byly zpracovány do přehledných tabulek. Každý graf charakterizuje průběh silového zatížení právě během jednoho úběru materiálu řezným nástrojem za daných řezných podmínek.

Za předpokladu, že se velikost síly řezání mění v průběhu obrábění v čase, stane se limitujícím prvkem úsek dosahující maximálních hodnot. Takovéto hodnoty odpovídají maximální hodnotě řezného odporu obráběného materiálu vůči řeznému klínu nástroje. Vysoké síly řezání, znamenají vysoký výkon, který je však omezen. Dochází k větší deformaci řezných nástrojů a obrobků, což může mít za následek vznik nežádoucích vibrací a rychlé opotřebení nástroje.

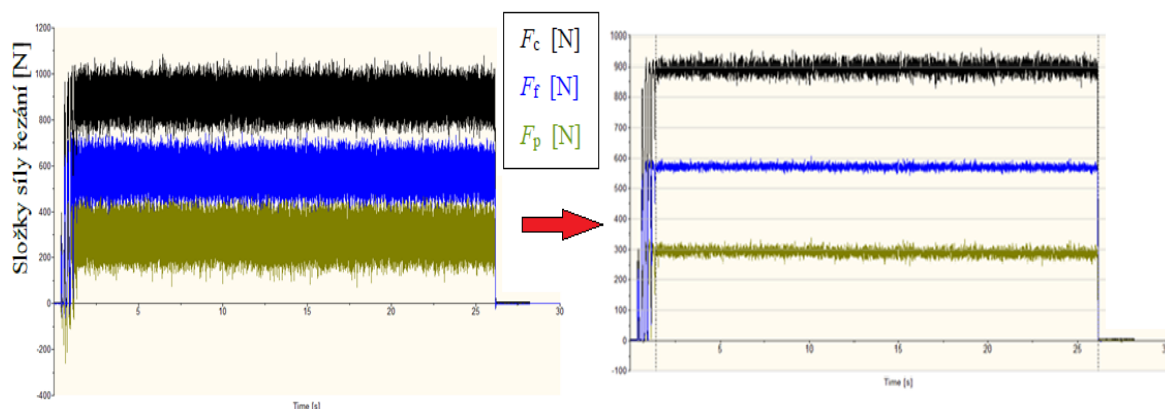
Měření složek sil řezání materiálů 1.1191 a slitiny 2.4856 bylo prováděno za předem stanovených řezných podmínek pro zvolené vyměnitelné břitové destičky, viz návrh experimentu. Navržením experimentu a následným naměřením průběhu silového zatížení pomocí dynamometru, bylo získáno velké množství dat. Průběh silového zatěžování s ohledem na vliv opotřebení nástroje a rostoucí řeznou sílu (řezný odpor) byl v experimentální části realizován vždy novým břitem nástroje. V tabulkách viz níže, jsou kromě průběhu zatěžování soustavy vypočteny i maximální a minimální hodnoty jednotlivých složek sil řezání. Tyto hodnoty jsou z důvodu snížení vlivu nežádoucích vibrací filtrovány pomocí Low Pass filtru, viz obr. 5.1. Tento filtr slouží jako zeslabovač signálů s frekvencemi vyššími než je mezní frekvence a jeho použitím se získá méně detailů.



Obr. 5.1 Low Pass filtr pro snížení detailu signálu

Obrázek 5.2 znázorňuje graf, kdy bylo provedeno obrábění materiálu 1.1191, řeznou rychlostí $v_c=180 \text{ m.min}^{-1}$, posuvem $f=0,4 \text{ mm}$ a hloubkou řezu $a_p=1 \text{ mm}$ bez filtrovaných

hodnot a následně graf s hodnotami vyfiltrovanými pomocí Low Pass filtru, orientace v grafu s filtrovanými hodnotami je mnohem jednodušší, jelikož byla eliminována vysoká frekvence kmitání. Zejména při obrábění slitiny 2.4856 se začaly projevovat vibrace, které bylo možné pozorovat i akusticky, tento vliv byl také odfiltrován pomocí Low Pass filtru.



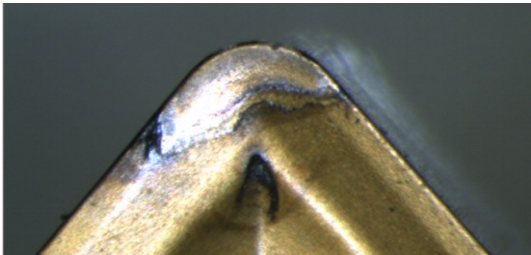
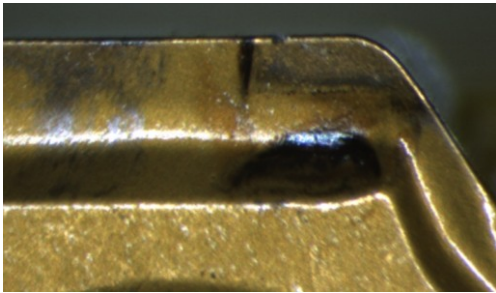
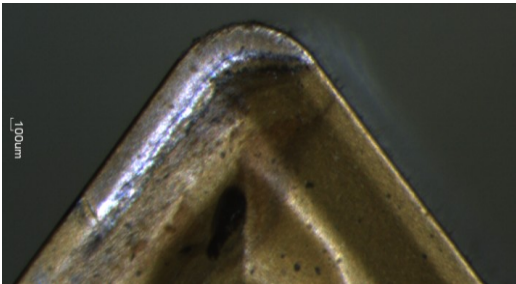
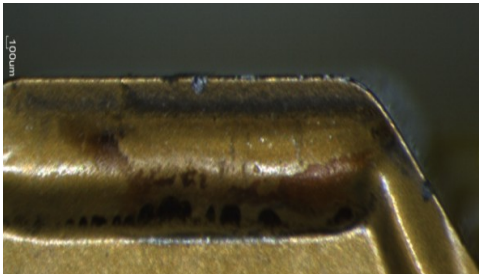
Obr. 5.2 Filtrování grafu a) nefiltrovaný graf (vlevo) b) filtrovaný graf (vpravo)

5.1 Vyhodnocení opotřebení vyměnitelných břitových destiček


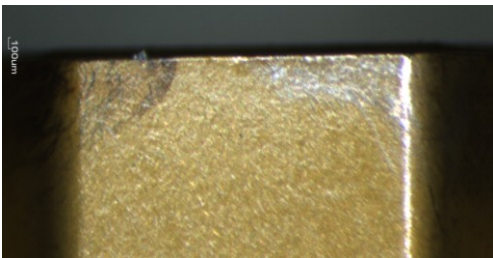
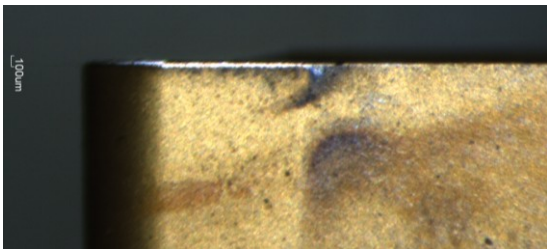

V následujících tabulkách je zobrazeno opotřebení vyměnitelných břitových destiček na čele a hřbetu. V tabulkách jsou uvedeny řezné podmínky, za kterých se experiment uskutečnil, dále jsou zde vloženy fotky pořízené pomocí binokulárního stereomikroskopu, který je vybaven digitální kamerou. Díky zabudované digitální kameře bylo možné přenést snímky do počítače, kde byla následně pomocí programu Motic Images Plus 2.0 a kalibrované optice možnost sledovat velikost opotřebení vyměnitelných břitových destiček viz obr. 5.3

Jelikož není Má práce na zkoumání opotřebení zaměřená, konkrétní hodnoty velikostí opotřebení nebyly stanoveny. Pro názornost bylo Opotřebení sledováno pouze dle fotografií. V tabulkách 5.1, 5.2, 5.3 a 5.4 je nafoceno opotřebení po obrábění danými řeznými podmínkami na čele i hřbetu VBD, pro oba druhy testovaných materiálů. V tabulce 5.5 jsou zobrazeny druhy třísek vzniklých při obrábění materiálů danými řeznými podmínkami. Dle této tabulky je možno usoudit, že při větší hloubce řezu a menším posuvu se tvoří dlouhá vinutá tříska, na rozdíl od obrábění podmínkami, kdy je dána menší hloubka řezu a vyšší hodnota posuvu.

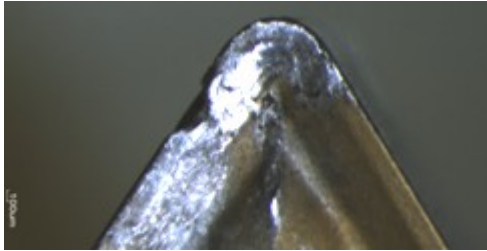
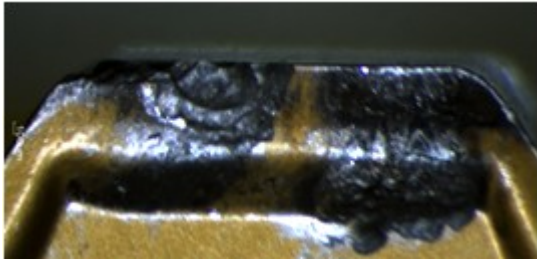
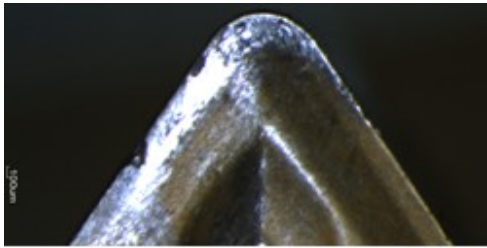
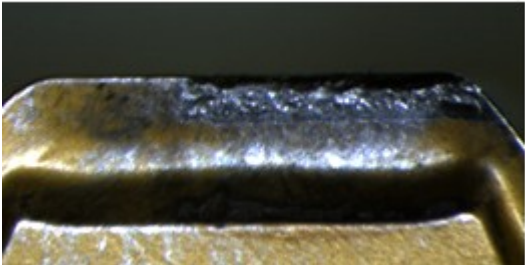
Tab. 5.1 Opotřebení na čele při obrábění oceli 1.1191

1.1191	CNMG 120408 - SM			CNMX 1204A2 - SM		
	$a_p=1\text{ mm}$	$f=0,4\text{ mm}$	$v_c=180\text{ m.min}^{-1}$	$a_p=1\text{ mm}$	$f=0,4\text{ mm}$	$v_c=180\text{ m.min}^{-1}$
						
	CNMG 120408 - SM			CNMX 1204A2 - SM		
	$a_p=2\text{ mm}$	$f=0,2\text{ mm}$	$v_c=180\text{ m.min}^{-1}$	$a_p=2\text{ mm}$	$f=0,2\text{ mm}$	$v_c=180\text{ m.min}^{-1}$
						

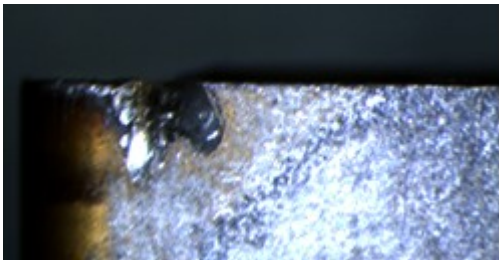
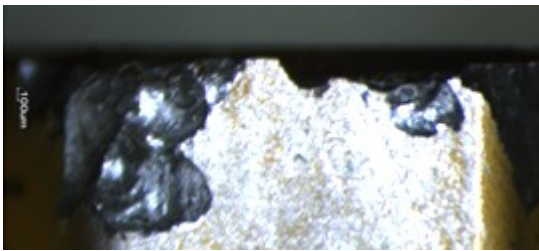
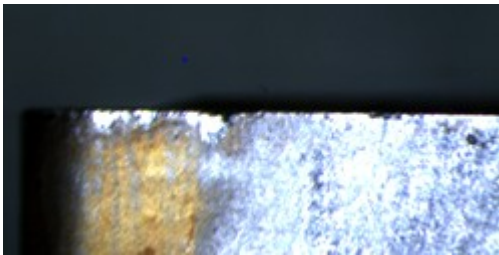

Tab. 5.2 Opotřebení na hřbetu při obrábění oceli 1.1191

1.1191	CNMG 120408 - SM			CNMX 1204A2 - SM		
	$a_p=1\text{ mm}$	$f=0,4\text{ mm}$	$v_c=180\text{ m.min}^{-1}$	$a_p=1\text{ mm}$	$f=0,4\text{ mm}$	$v_c=180\text{ m.min}^{-1}$
						
	CNMG 120408 - SM			CNMX 1204A2 - SM		
	$a_p=2\text{ mm}$	$f=0,2\text{ mm}$	$v_c=180\text{ m.min}^{-1}$	$a_p=2\text{ mm}$	$f=0,2\text{ mm}$	$v_c=180\text{ m.min}^{-1}$
						


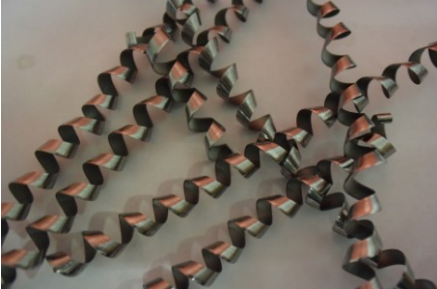






Tab. 5.3 Opotřebení na čele při obrábění slitiny 2.4856

2.4856	CNMG 120408 - SM			CNMX 1204A2 - SM		
	$a_p=1\text{ mm}$	$f=0,3\text{ mm}$	$v_c=40\text{ m.min}^{-1}$	$a_p=1\text{ mm}$	$f=0,3\text{ mm}$	$v_c=40\text{ m.min}^{-1}$
						
	CNMG 120408 - SM			CNMX 1204A2 - SM		
	$a_p=2\text{ mm}$	$f=0,15\text{ mm}$	$v_c=40\text{ m.min}^{-1}$	$a_p=2\text{ mm}$	$f=0,15\text{ mm}$	$v_c=40\text{ m.min}^{-1}$
						

Tab. 5.4 Opotřebení na hřbetu při obrábění slitiny 2.4856

2.4856	CNMG 120408 - SM			CNMX 1204A2 - SM		
	$a_p=1\text{ mm}$	$f=0,3\text{ mm}$	$v_c=40\text{ m.min}^{-1}$	$a_p=1\text{ mm}$	$f=0,3\text{ mm}$	$v_c=40\text{ m.min}^{-1}$
						
	CNMG 120408 - SM			CNMX 1204A2 - SM		
	$a_p=2\text{ mm}$	$f=0,15\text{ mm}$	$v_c=40\text{ m.min}^{-1}$	$a_p=2\text{ mm}$	$f=0,15\text{ mm}$	$v_c=40\text{ m.min}^{-1}$
						

Tab. 5.5 Druhy třísek vzniklé po obrábění oceli 1.1191 i slitiny 2.4856

1.1191	CNMG 120408 - SM			CNMG 120408 - SM		
	$a_p=1\text{ mm}$	$f=0,4\text{ mm}$	$v_c=180\text{ m.min}^{-1}$	$a_p=2\text{ mm}$	$f=0,2\text{ mm}$	$v_c=180\text{ m.min}^{-1}$
						
	CNMX 1204A2 - SM			CNMX 1204A2 - SM		
	$a_p=1\text{ mm}$	$f=0,4\text{ mm}$	$v_c=180\text{ m.min}^{-1}$	$a_p=2\text{ mm}$	$f=0,2\text{ mm}$	$v_c=180\text{ m.min}^{-1}$
						
2.4856	CNMG 120408 - SM			CNMG 120408 - SM		
	$a_p=1\text{ mm}$	$f=0,3\text{ mm}$	$v_c=40\text{ m.min}^{-1}$	$a_p=2\text{ mm}$	$f=0,15\text{ mm}$	$v_c=40\text{ m.min}^{-1}$
						
	CNMX 1204A2 - SM			CNMX 1204A2 - SM		
	$a_p=1\text{ mm}$	$f=0,3\text{ mm}$	$v_c=40\text{ m.min}^{-1}$	$a_p=2\text{ mm}$	$f=0,15\text{ mm}$	$v_c=40\text{ m.min}^{-1}$
						

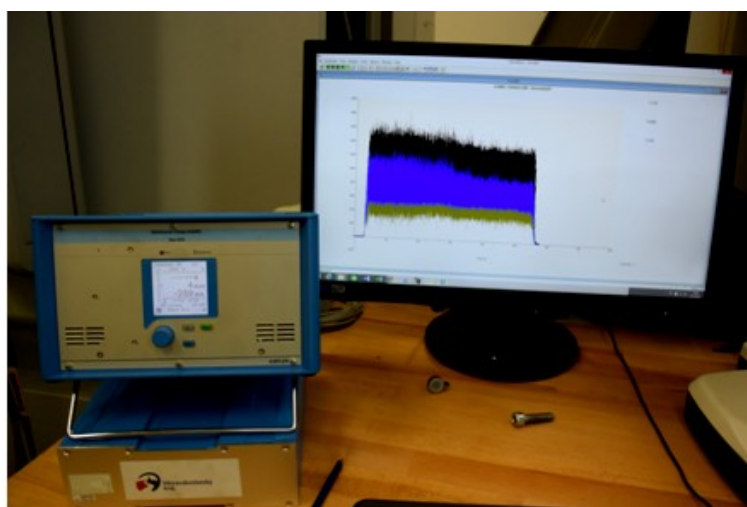
Z tabulek, viz výše, se dá usoudit, že je možno obrábět materiál 1.1191 oběma VBD za daných řezných podmínek. Obrábění slitiny 2.4856 je díky její houževnatosti a dalším vlastnostem mnohem obtížnější, vyměnitelné břitové destičky jsou zcela zničené zejména při řezných podmínkách označenými jako test 1. Tyto podmínky jsou pro obrábění slitiny 2.4856 nevhodné, i když se nachází v rozmezí doporučených hodnot.



Obr. 5.3 Laboratorní sestava pro měření opotřebení nástrojů

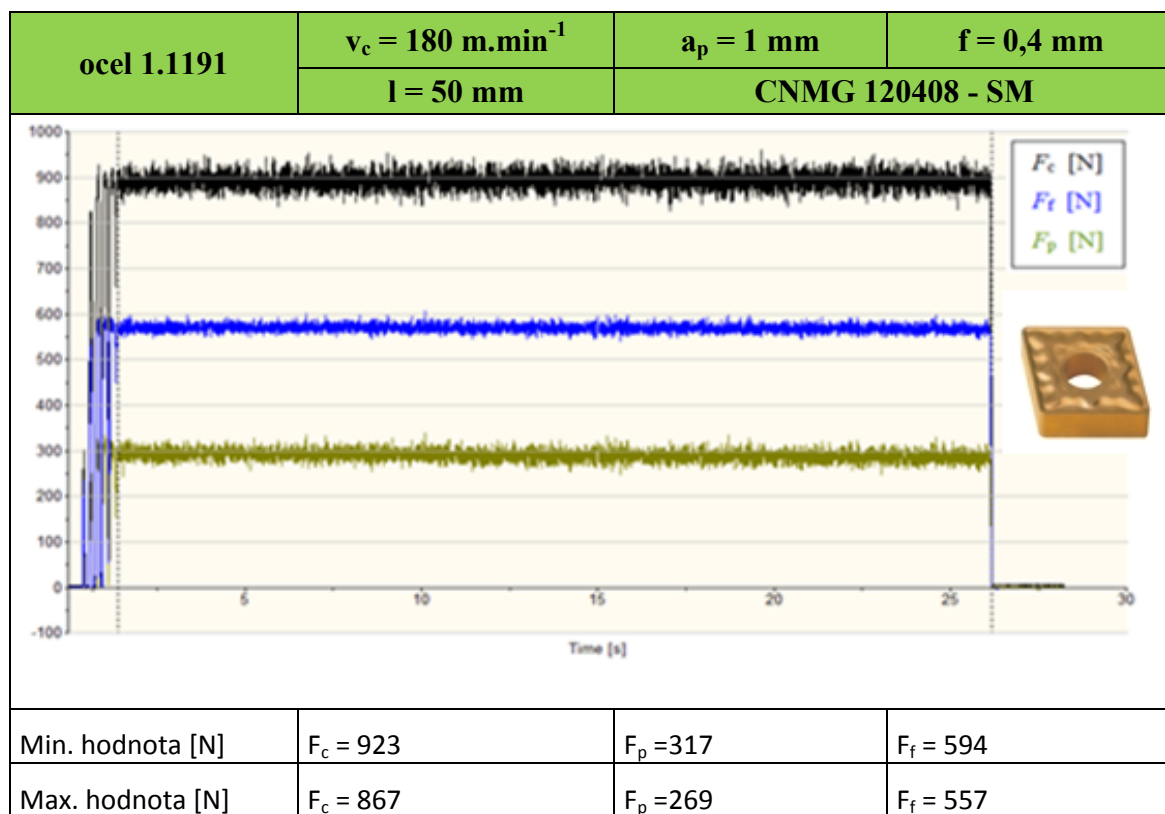
5.2 Vyhodnocení silových poměrů při obrábění

V následujících tabulkách jsou zobrazeny výsledky jednotlivých testů měření pro ocel 1.1191 i slitinu 2.4856. V tabulkách jsou uvedeny řezné parametry, za kterých byly testy prováděny. V tabulkách se nachází grafy s filtrovanými hodnotami jednotlivých složek sil a jsou zde časové průběhy zatěžování při obrábění, za kterých probíhalo následné zpracování naměřených hodnot. V tabulkách jsou uvedeny maximální a minimální hodnoty řezných složek sil a jsou zde také vyobrazeny vyměnitelné břitové destičky, kterými byl experiment prováděn. Naměřené hodnoty byly přivedeny do zesilovacího zařízení KISTLER 5070 A pomocí optického kabelu připojeného na základní jednotku dynamometru a následně přeneseny v podobě milivoltaického napětí do převodníku KISTLER 5697. Zpracování výsledků silového zatížení proběhlo pomocí PC sestavy a nainstalovaného softwaru DynoWare 2825D – 02 taktéž od společnosti KISTLER, viz obr. 5.4.

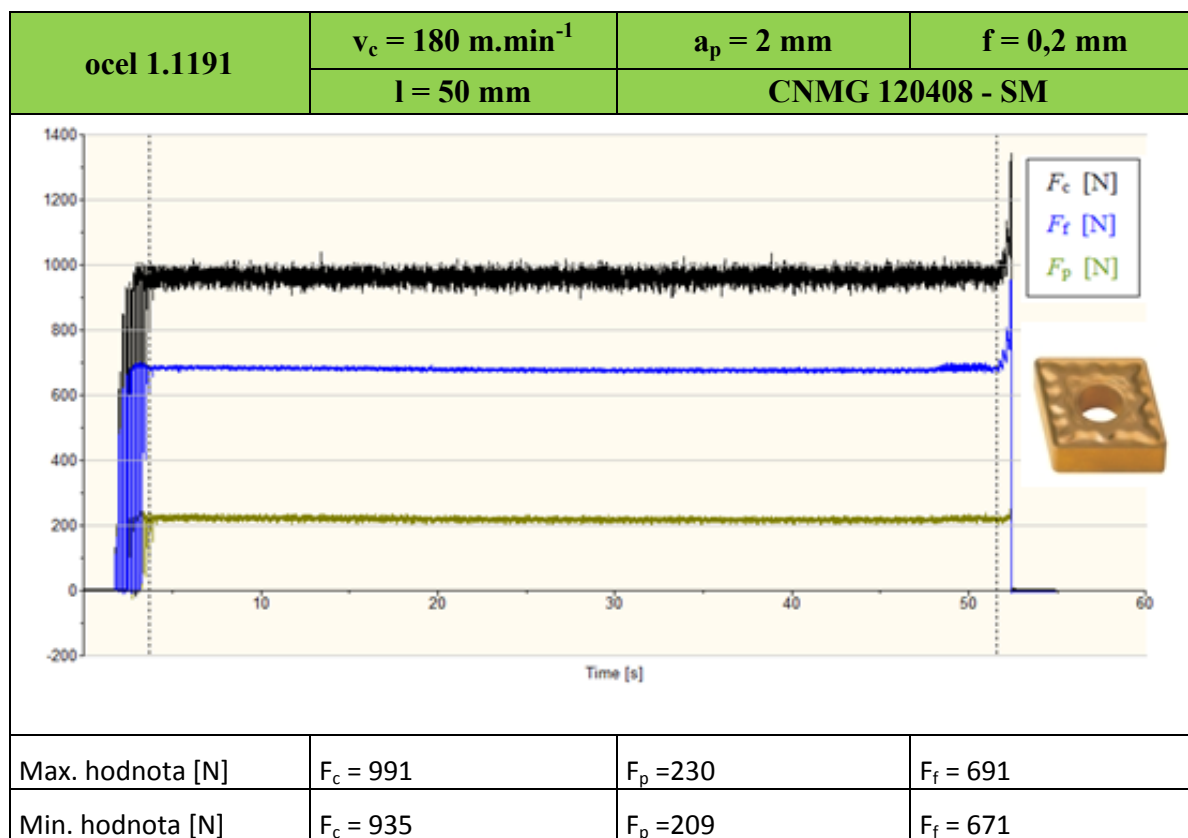


Obr. 5.4 Zpracování výsledků měření sil dynamometrem 9129AA

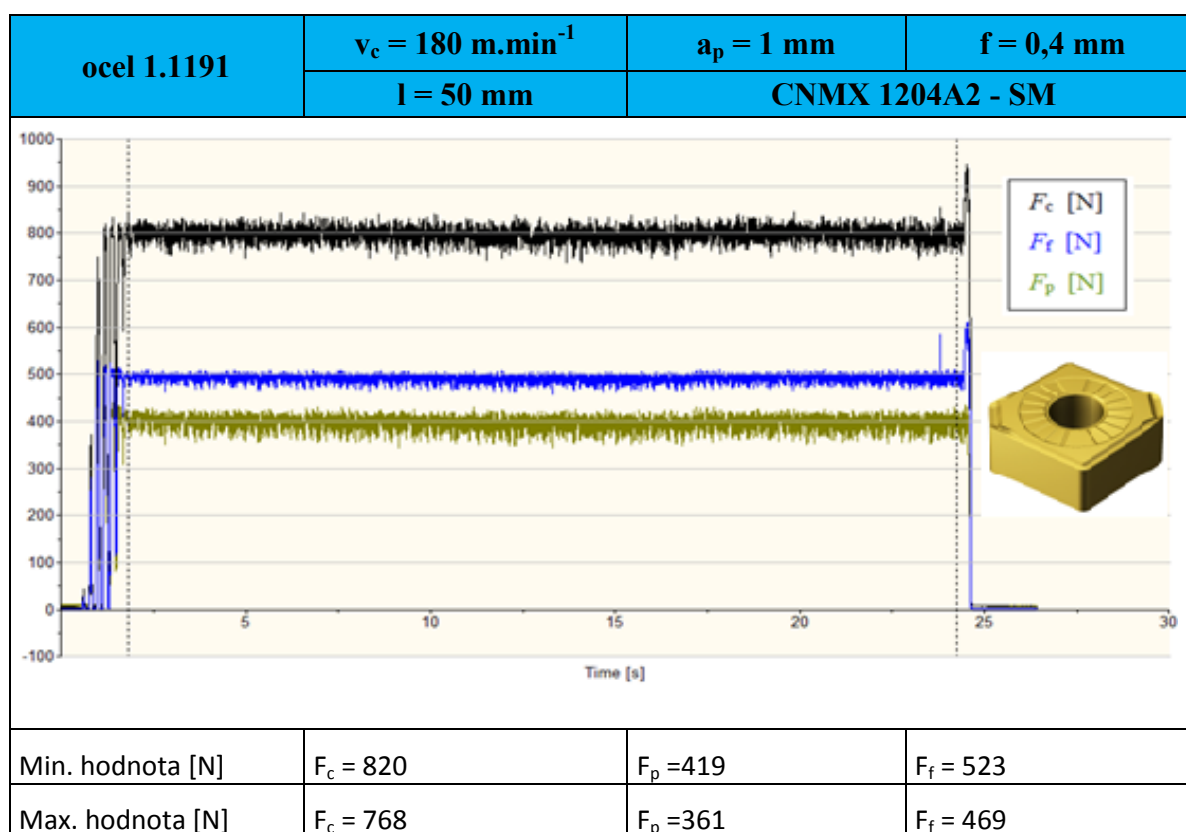
Tab. 5.6 Průběh měření složek F_c , F_f , F_p - Test 1 pro ocel 1.1191



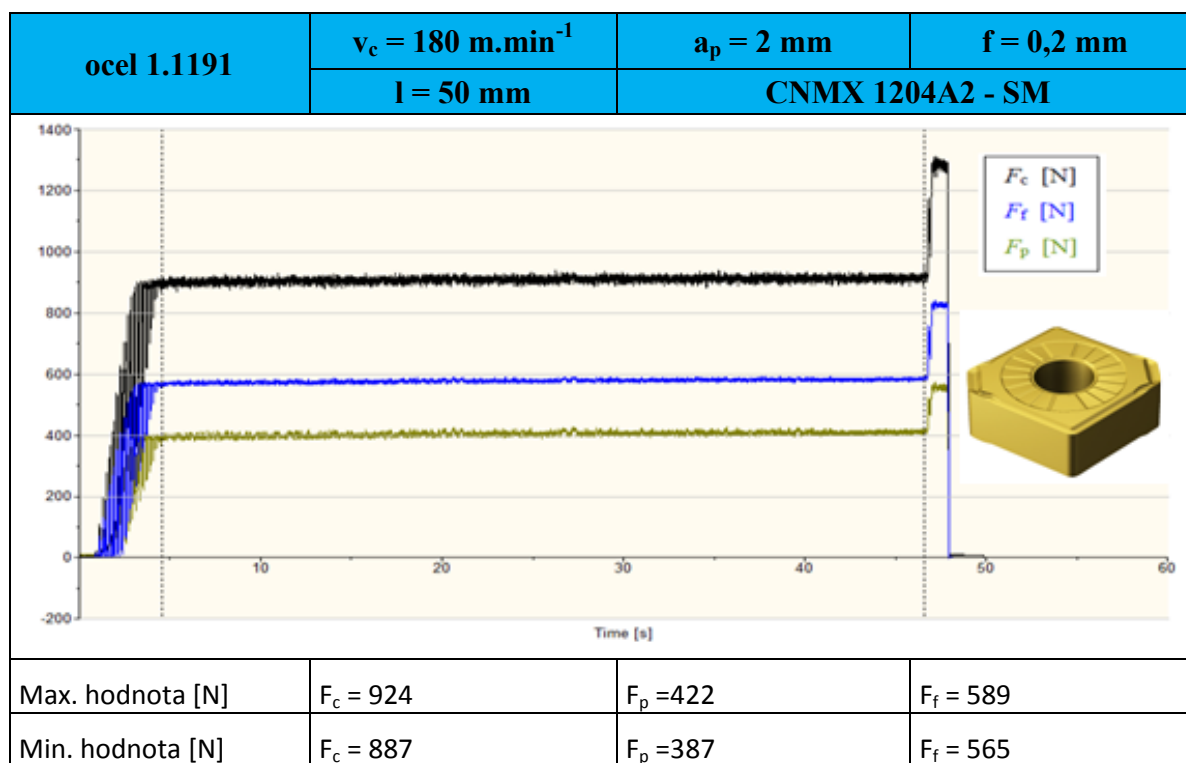
Tab. 5.7 Průběh měření složek F_c , F_f , F_p - Test 2 pro ocel 1.1191



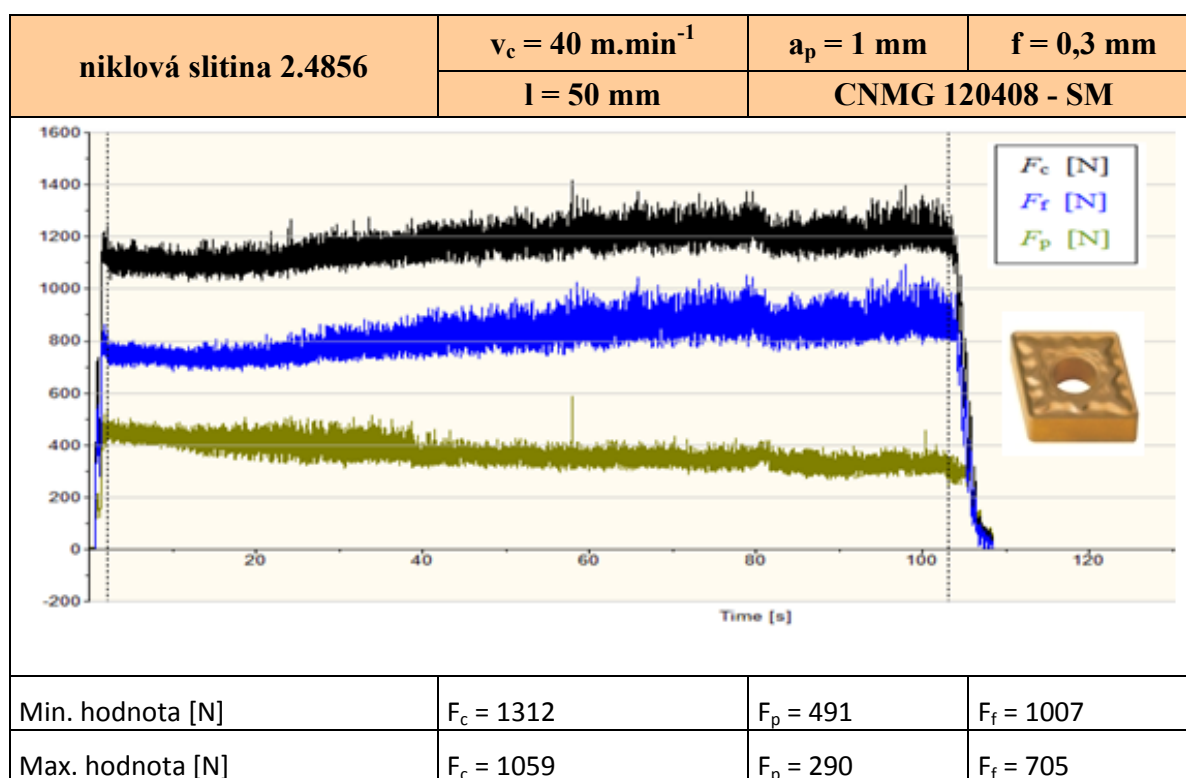
Tab. 5.8 Průběh měření složek F_c , F_f , F_p - Test 3 pro ocel 1.1191



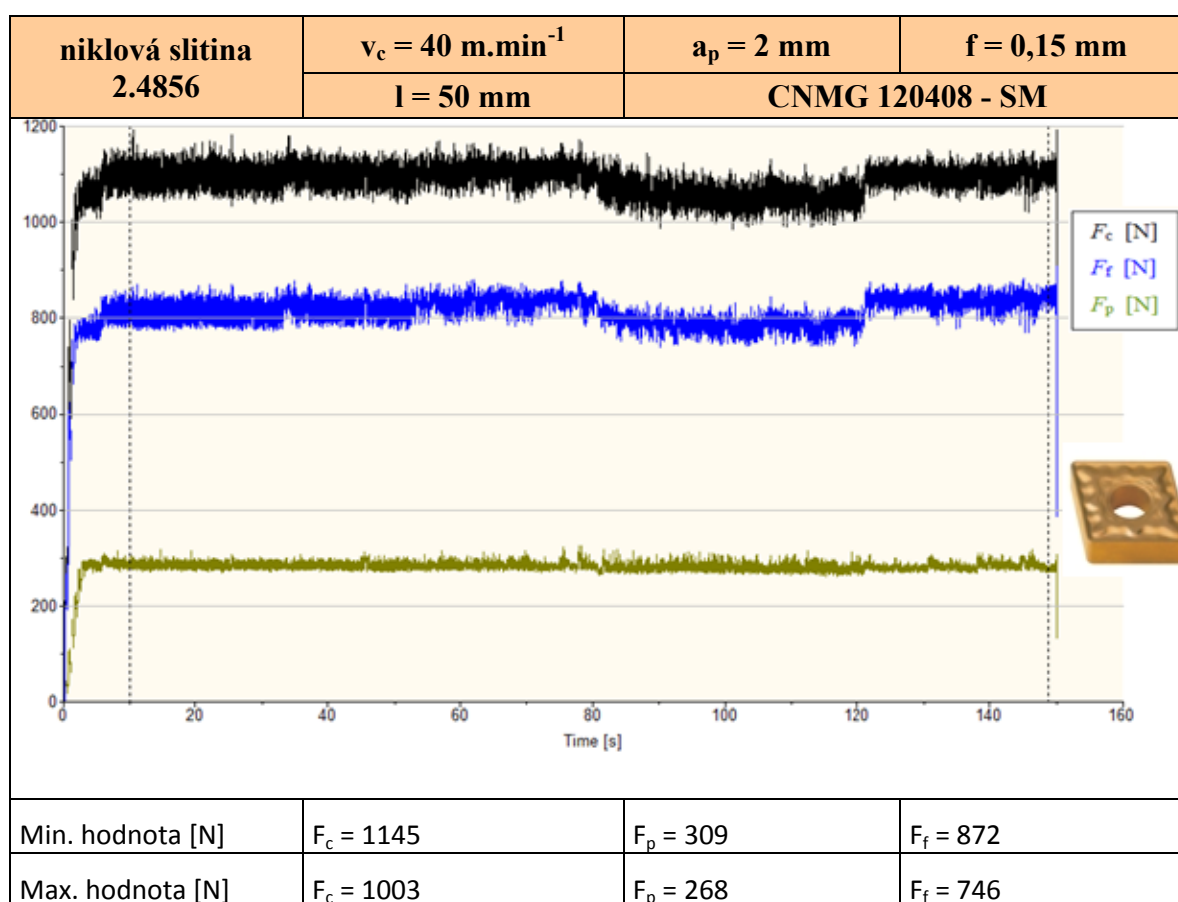
Tab. 21 Průběh měření složek F_c , F_f , F_p - Test 4 pro ocel 1.1191



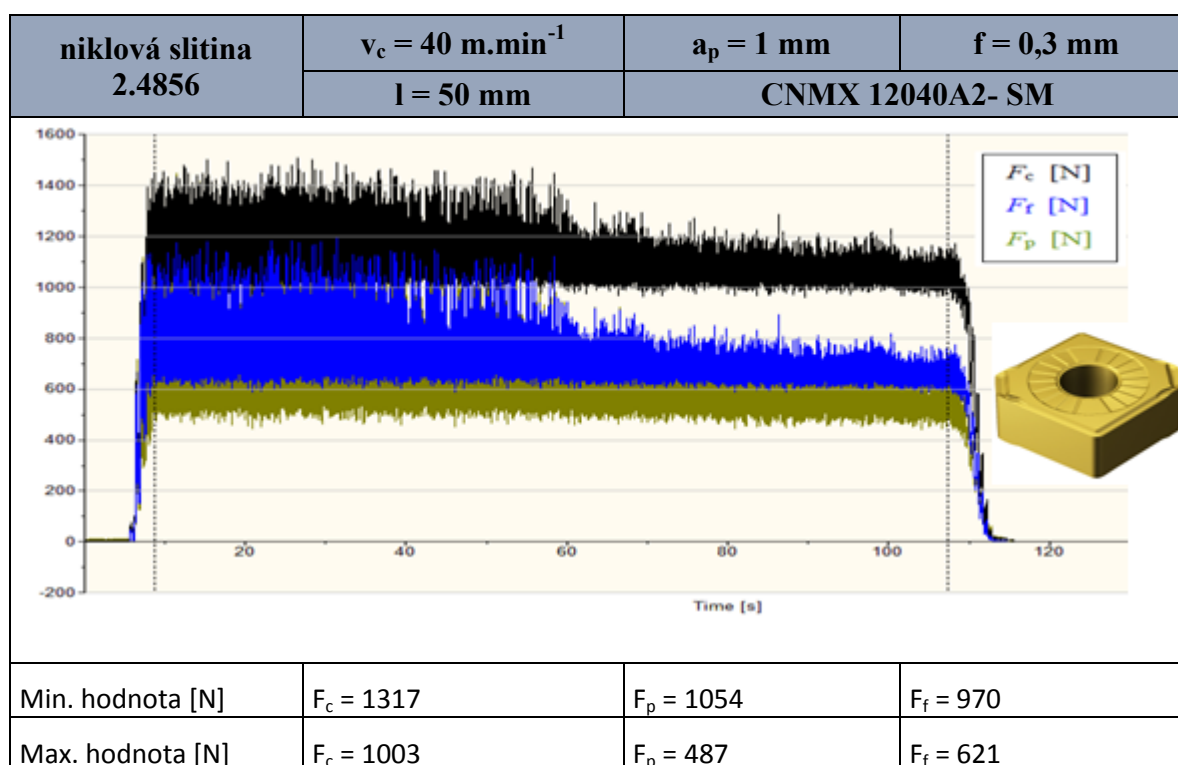
Tab. 5.9 Průběh měření složek F_c , F_f , F_p - Test 1 pro slitinu 2.4856



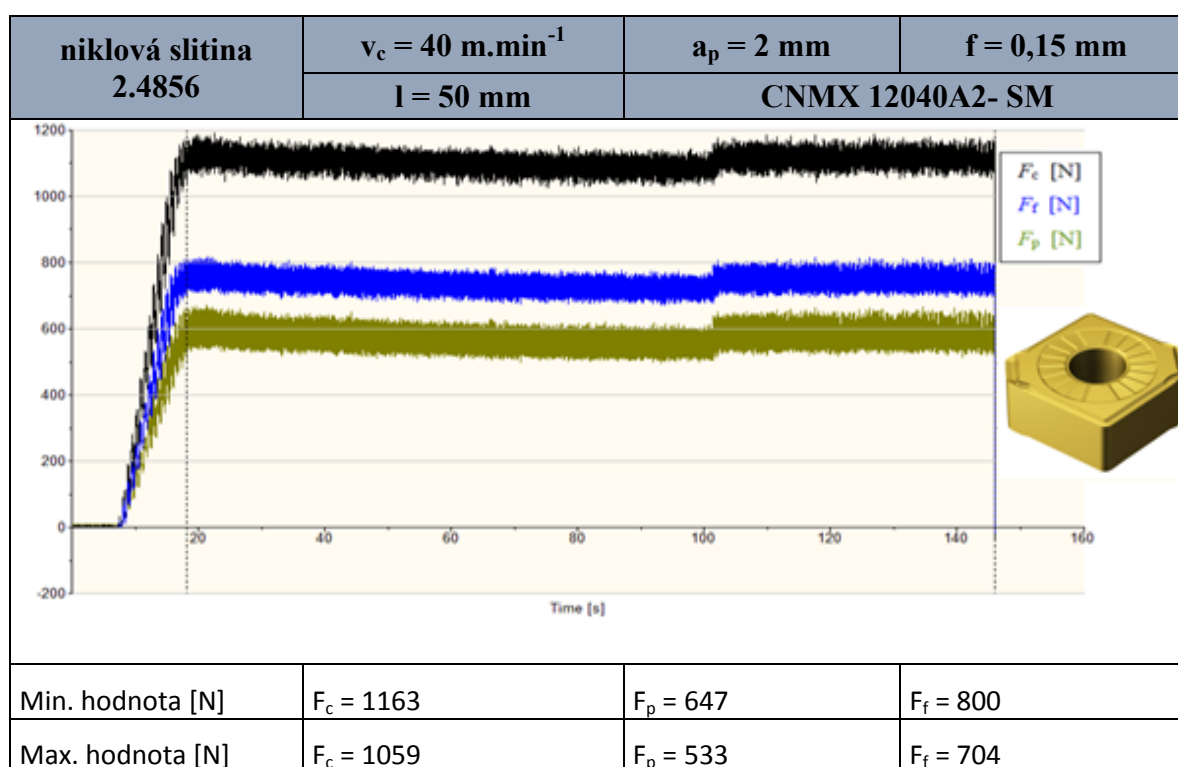
Tab. 5.10 Průběh měření složek F_c , F_f , F_p - Test 2 pro slitinu 2.4856



Tab. 5.1 Průběh měření složek F_c , F_f , F_p - Test 3 pro slitinu 2.4856



Tab. 5.12 Průběh měření složek F_c , F_f , F_p - Test 4 pro slitinu 2.4856



Na základě naměřených hodnot složek F_c , F_p a F_f byla vypočítána výsledná síla při soustružení oceli 1.1191 a slitiny 2.4856 vyměnitelnými břitovými destičkami CNMG 120408 – SM a CNMX 1204A2 – SM. Stanovení výsledné síly řezání předcházelo statistické zpracování naměřených hodnot, dle následujících vztahů. Pro stanovení rozšířené nejistoty byl použit koeficient rozšíření $k_U=2$ (pravděpodobnost pokrytí $p = 95,5\%$). Pro ukázkou je rozepsán výpočet výsledné síly při obrábění oceli 1.1191 destičkou CNMG 120408 - SM, jestliže byly řezné podmínky nastaveny následovně řezná rychlost $v_c=180 \text{ m.min}^{-1}$, posuv $f=0,4 \text{ mm}$ a hloubka řezu $a_p=1 \text{ mm}$, jednotlivé kroky výpočtu jsou uvedeny v tabulce 5.13.

Výběrový průměr: [30]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad 5.2.1$$

Výběrová směrodatná odchylka: [30]

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad 5.2.2$$

Směrodatná odchylka aritmetického průměru (standardní nejistota typu A): [30]

$$u_A = s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \quad 5.2.3$$

Rozšířená nejistota: [30]

$$U = k_U \cdot u_A \quad 5.2.4$$

Výpočet celkové směrodatné odchylky pro celkovou sílu řezání F : [30]

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} = (\bar{F} \pm U) [N] \quad 5.2.5$$

$$\frac{\partial F}{\partial F_c} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}} \cdot 2F_c = \frac{F_c}{\sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}} = \frac{F_c}{F} \quad 5.2.6$$

$$\frac{\partial F}{\partial F_p} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}} \cdot 2F_p = \frac{F_p}{\sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}} = \frac{F_p}{F} \quad 5.2.7$$

$$\frac{\partial F}{\partial F_f} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}} \cdot 2F_f = \frac{F_f}{\sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}} = \frac{F_f}{F} \quad 5.2.8$$

$$S_{(F)} = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial F_c} \cdot S_{(F_c)}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial F_f} \cdot S_{(F_f)}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial F_p} \cdot S_{(F_p)}\right)^2} \quad 5.2.9$$

Tab. 5.13 Průběh statistického zpracování hodnot silového zatížení

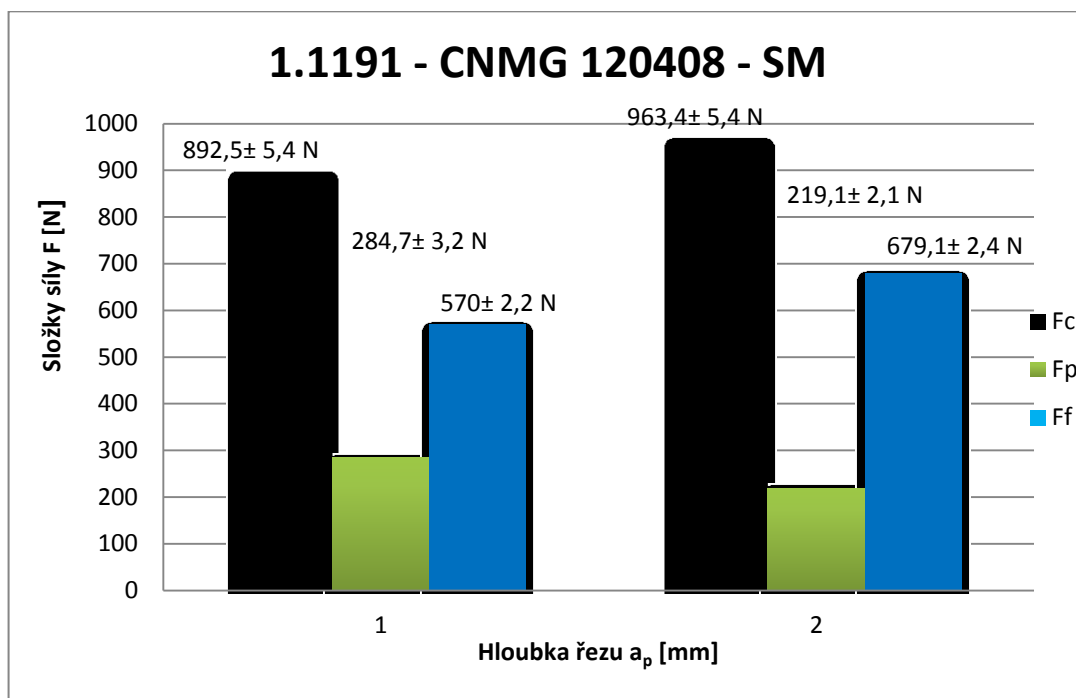
1.1191	CNMG 120408 - SM		$v_c=40 \text{ m.min}^{-1}$ $a_p=1 \text{ mm}$ $f=0,4 \text{ mm}$							
F_c [N]										
č.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
xi	891	900	906	893	901	897	880	884	885	888
$\Sigma = 8925$		$F=892,5$		$s(F) = 8,4$		$u_A = 2,7$		$U = 5,4$		
F_p [N]										
č.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
xi	277	287	287	288	277	283	289	283	292	284
$\Sigma=2847$		$F=284,7$		$s(F)=4,9$		$u_A=1,6$		$U=3,2$		
F_f [N]										
č.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
xi	568	574	566	570	573	570	564	572	569	574
$\Sigma = 5700$		$F=570$		$s(F) = 3,4$		$u_A = 1,1$		$U = 2,2$		
$F_c = 892,5 \pm 5,4N$				$F_p = 284,7 \pm 3,2N$			$F_f = 570 \pm 2,2N$			
$F= 1096,5 \pm 4,6N$										

Tab. 5.14 Statisticky zpracované hodnoty pro ocel 1.1191

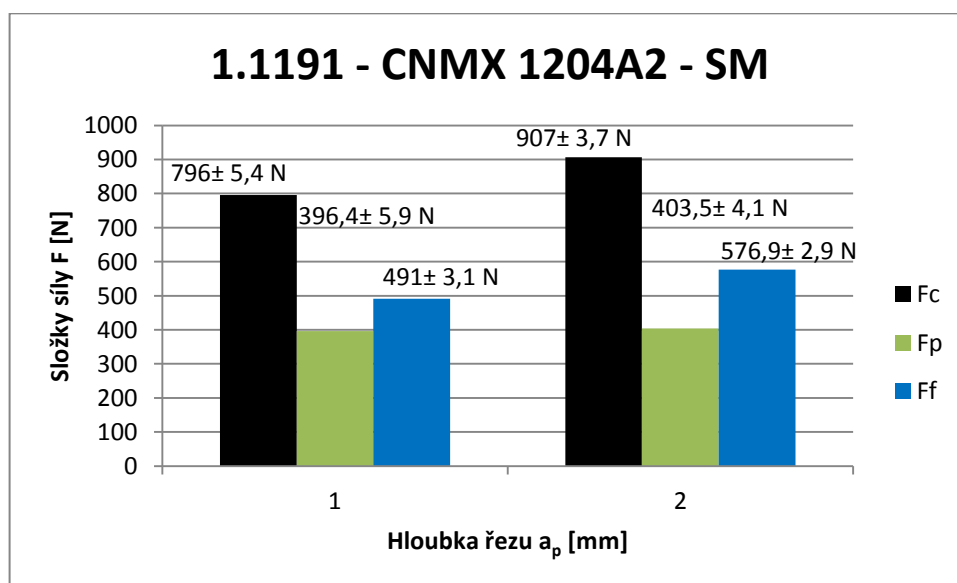
ocel 1.1191	$v_c = 180 \text{ m.min}^{-1}$	$a_p = 1 \text{ mm}$	$f = 0,4 \text{ mm}$
CNMG 120408 - SM	$F_c = (892,5 \pm 5,4)\text{N}$	$F_p = (284,7 \pm 3,2)\text{N}$	$F_f = (570 \pm 2,2)\text{N}$
$F = (1096,5 \pm 4,6)\text{N}$			
ocel 1.1191	$v_c = 180 \text{ m.min}^{-1}$	$a_p = 2 \text{ mm}$	$f = 0,2 \text{ mm}$
CNMG 120408 - SM	$F_c = (963,4 \pm 5,4)\text{N}$	$F_p = (219,1 \pm 2,1)\text{N}$	$F_f = (679,1 \pm 2,4)\text{N}$
$F = (1198,9 \pm 4,6)\text{N}$			
ocel 1.1191	$v_c = 180 \text{ m.min}^{-1}$	$a_p = 1 \text{ mm}$	$f = 0,4 \text{ mm}$
CNMX 1204A2 - SM	$F_c = (796 \pm 5,4)\text{N}$	$F_p = (396,4 \pm 5,9)\text{N}$	$F_f = (491 \pm 3,1)\text{N}$
$F = (1015,8 \pm 5)\text{N}$			
ocel 1.1191	$v_c = 180 \text{ m.min}^{-1}$	$a_p = 2 \text{ mm}$	$f = 0,2 \text{ mm}$
CNMX 1204A2 - SM	$F_c = (907 \pm 3,7)\text{N}$	$F_p = (403,5 \pm 4,1)\text{N}$	$F_f = (576,9 \pm 2,9)\text{N}$
$F = (1148,2 \pm 3,4)\text{N}$			

V následujících grafech jsou zobrazeny hodnoty složek řezných sil pro ocel 1.1191 pro vyměnitelné břitové destičky CNMG 120408 – SM i CNMX 1204A2 – SM. V těchto grafech můžeme vidět rostoucí hodnoty řezné složky síly F_c a posuvové složky síly F_f při řezných podmínkách, kde byla dána řezná rychlost $v_c=180 \text{ m.min}^{-1}$, posuv $f=0,2 \text{ mm}$ a hloubka řezu $a_p=2 \text{ mm}$. Při těchto řezných podmínkách klesala hodnota pasivní složky síly

F_p v grafu 5.1, při obrábění VBD CNMG 1204A2 – SM, je hodnota pasivní složky síly konstantní pro oba druhy zvolených řezných podmínek viz graf 5.2.

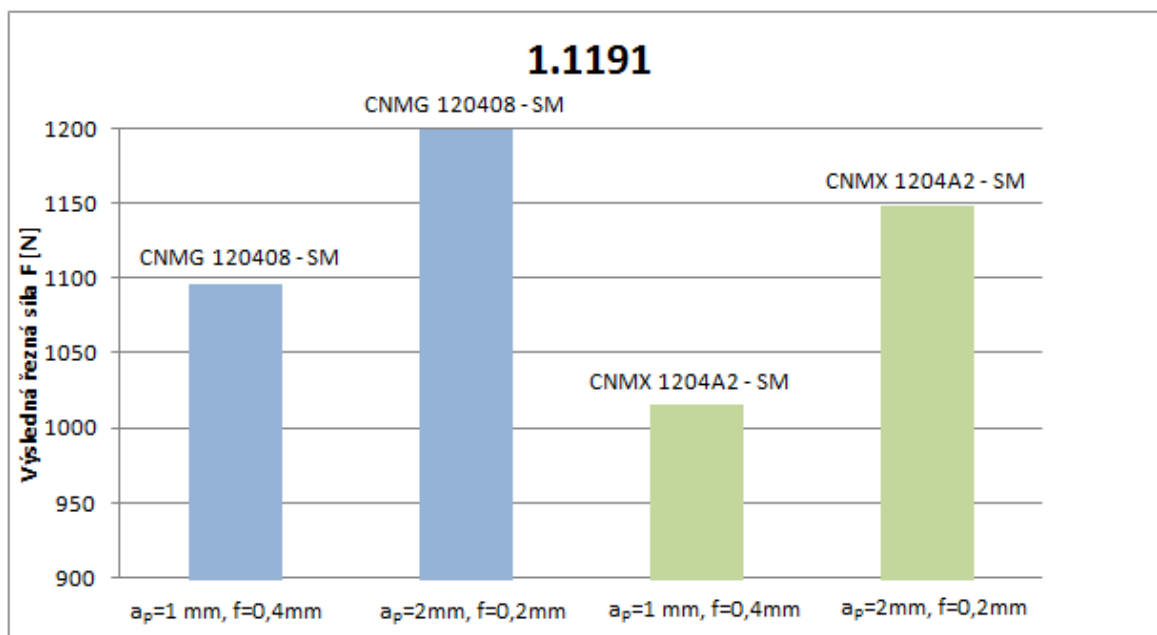


Graf 5.1. Závislost složek sil na řezných podmínkách při obrábění oceli 1.1191
VBD CNMG 120408 - SM



Graf 5.2. Závislost složek sil na řezných podmínkách při obrábění oceli 1.1191
VBD CNMX 1204A2 – SM

Výsledné řezné síly pro materiál 1.1191 je možno vidět v grafu 5.3. Při obrábění destičkou CNMG 120408 – SM při stejných řezných podmínkách vychází výsledná řezná síla vyšší.

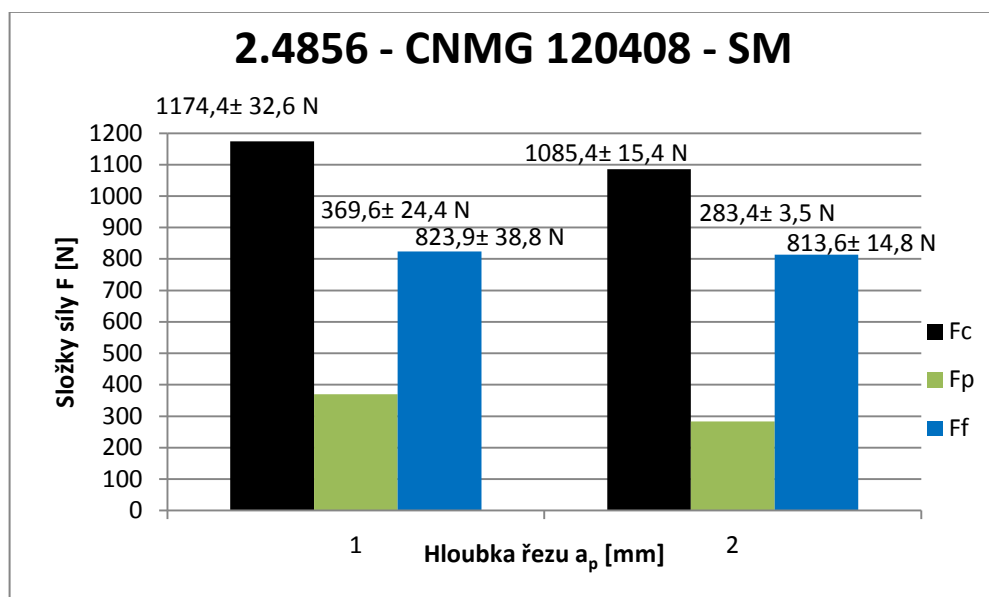


Graf 5.3. Výsledné řezné síly pro materiál 1.1191

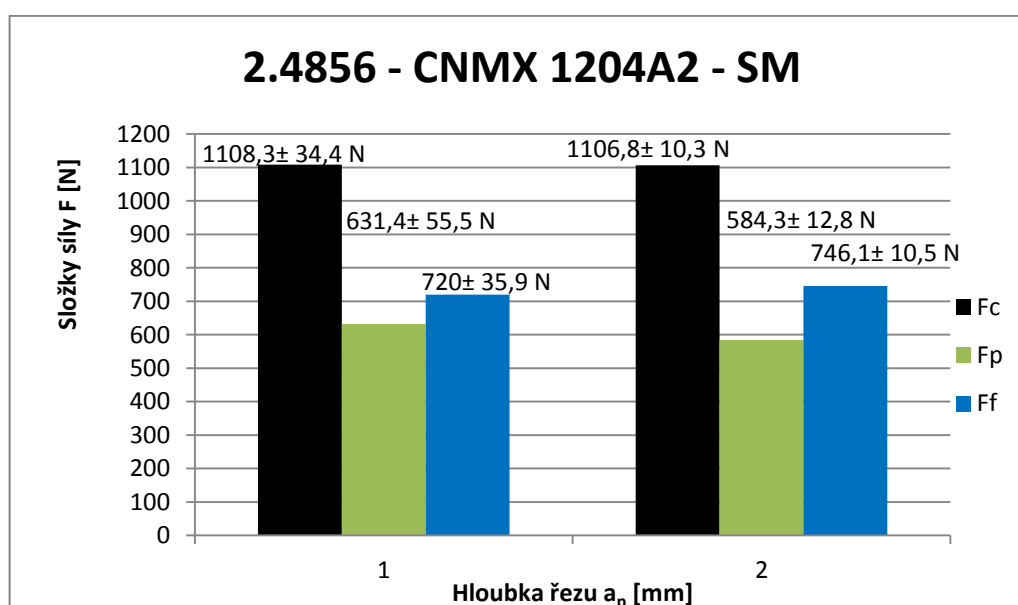
Tab. 5.15 Statisticky zpracované hodnoty pro slitinu 2.4856

slitina 2.4856	$v_c = 40 \text{ m.min}^{-1}$	$a_p = 1 \text{ mm}$	$f = 0,3 \text{ mm}$
CNMG 120408 - SM	$F_c = (1174,4 \pm 32,6)\text{N}$	$F_p = (369,6 \pm 24,4)\text{N}$	$F_f = (823,9 \pm 38,8)\text{N}$
$F = (1481,4 \pm 34,2)\text{N}$			
slitina 2.4856	$v_c = 40 \text{ m.min}^{-1}$	$a_p = 2 \text{ mm}$	$f = 0,15 \text{ mm}$
CNMG 120408 - SM	$F_c = (1085,4 \pm 15,4)\text{N}$	$F_p = (283,4 \pm 3,5)\text{N}$	$F_f = (813,6 \pm 14,8)\text{N}$
$F = (1385,8 \pm 14,9)\text{N}$			
slitina 2.4856	$v_c = 40 \text{ m.min}^{-1}$	$a_p = 1 \text{ mm}$	$f = 0,3 \text{ mm}$
CNMX 1204A2 - SM	$F_c = (1108,3 \pm 34,4)\text{N}$	$F_p = (631,4 \pm 55,5)\text{N}$	$F_f = (720 \pm 35,9)\text{N}$
$F = (1464,7 \pm 39,5)\text{N}$			
slitina 2.4856	$v_c = 40 \text{ m.min}^{-1}$	$a_p = 2 \text{ mm}$	$f = 0,15 \text{ mm}$
CNMX 1204A2 - SM	$F_c = (1106,8 \pm 10,3)\text{N}$	$F_p = (584,3 \pm 12,8)\text{N}$	$F_f = (746,1 \pm 10,5)\text{N}$
$F = (1454,5 \pm 10,8)\text{N}$			

V následujících grafech jsou zobrazeny hodnoty složek řezných sil pro slitinu 2.4856 pro vyměnitelné břitové destičky CNMG 120408 – SM i CNMX 1204A2 – SM. Z grafu 5.4 je možno vyčíst vyšší hodnoty řezné složky síly F_c a pasivní složky síly F_p při řezných podmínkách, kde byla dána řezná rychlost $v_c=40 \text{ m.min}^{-1}$, posuv $f=0,3 \text{ mm}$ a hloubka řezu $a_p=1 \text{ mm}$. U hodnot posuvové složky síly F_f není vidět výraznější rozdíl. V grafu 5.5 nejsou při obrábění různými řeznými podmínkami vidět výraznější rozdíly naměřených hodnot řezných složek sil.

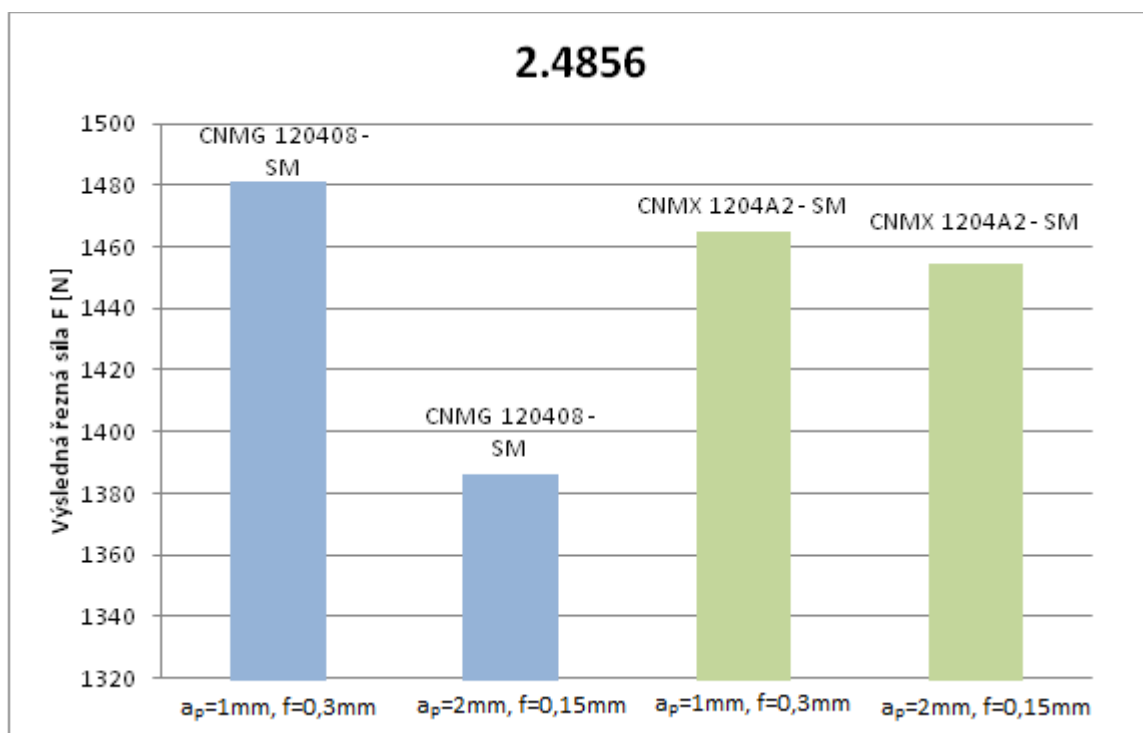


Graf 5.4. Závislost složek sil na řezných podmínkách při obrábění slitiny 2.4856
VBD CNMG 120408 - SM



Graf 5.5 Závislost složek sil na řezných podmínkách při obrábění slitiny 2.4856
VBD CNMX 1204A2 – SM

Výsledné řezné síly pro materiál 2.4856 je možno vidět v grafu 5.6. Při obrábění destičkou CNMG 120408 – SM při řezných podmínkách, kde byla dána řezná rychlost $v_c=40 \text{ m.min}^{-1}$, posuv $f=0,3 \text{ mm}$ a hloubka řezu $a_p=1 \text{ mm}$, vychází výsledná síla řezání nepatrně vyšší. Při řezné rychlosti $v_c=40 \text{ m.min}^{-1}$, posuvu $f=0,15 \text{ mm}$ a hloubce řezu $a_p=1 \text{ mm}$ je naopak výsledná síla řezání u VBD CNMG 120408 – SM nižší než u vyměnitelné břitové destičky CNMX 1204A2 – SM.



Graf 5.6 Výsledné řezné síly pro materiál 1.1191

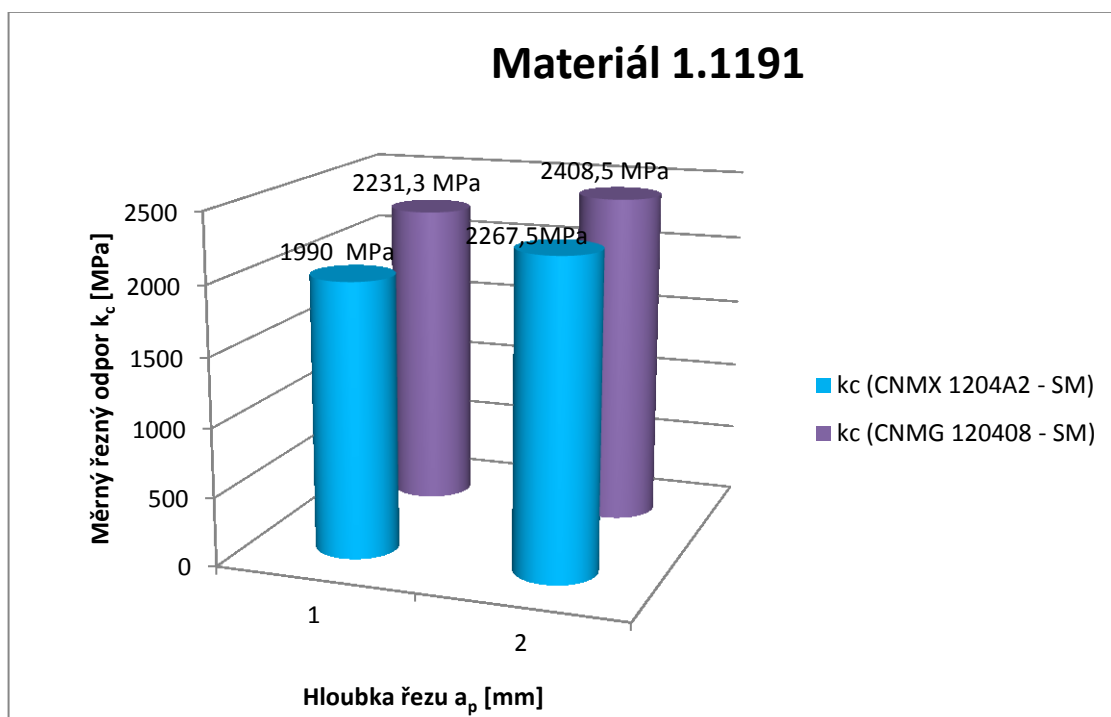
Z hodnot viz tabulky výše je možno vypočítat měrný řezný odpor dle vztahu: [5]

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \text{ [MPa]} \quad 5.2.10$$

Vypočtené hodnoty měrných řezných odporů, vypočítaných dle tohoto vztahu jsou zobrazeny v tabulkách 5.16 a 5.17.

Tab. 5.16 Velikosti měrných řezných odporů při obrábění oceli 1.1191

ocel 1.1191	$v_c = 180 \text{ m.min}^{-1}$	$a_p = 1 \text{ mm}$	$f = 0,4 \text{ mm}$
CNMG 120408 - SM	$k_c = 2231,3 \text{ MPa}$		
ocel 1.1191	$v_c = 180 \text{ m.min}^{-1}$	$a_p = 2 \text{ mm}$	$f = 0,2 \text{ mm}$
CNMG 120408 - SM	$k_c = 2408,5 \text{ MPa}$		
ocel 1.1191	$v_c = 180 \text{ m.min}^{-1}$	$a_p = 1 \text{ mm}$	$f = 0,4 \text{ mm}$
CNMX 1204A2 - SM	$k_c = 1990 \text{ MPa}$		
ocel 1.1191	$v_c = 180 \text{ m.min}^{-1}$	$a_p = 2 \text{ mm}$	$f = 0,2 \text{ mm}$
CNMX 1204A2 - SM	$k_c = 2267,5 \text{ MPa}$		

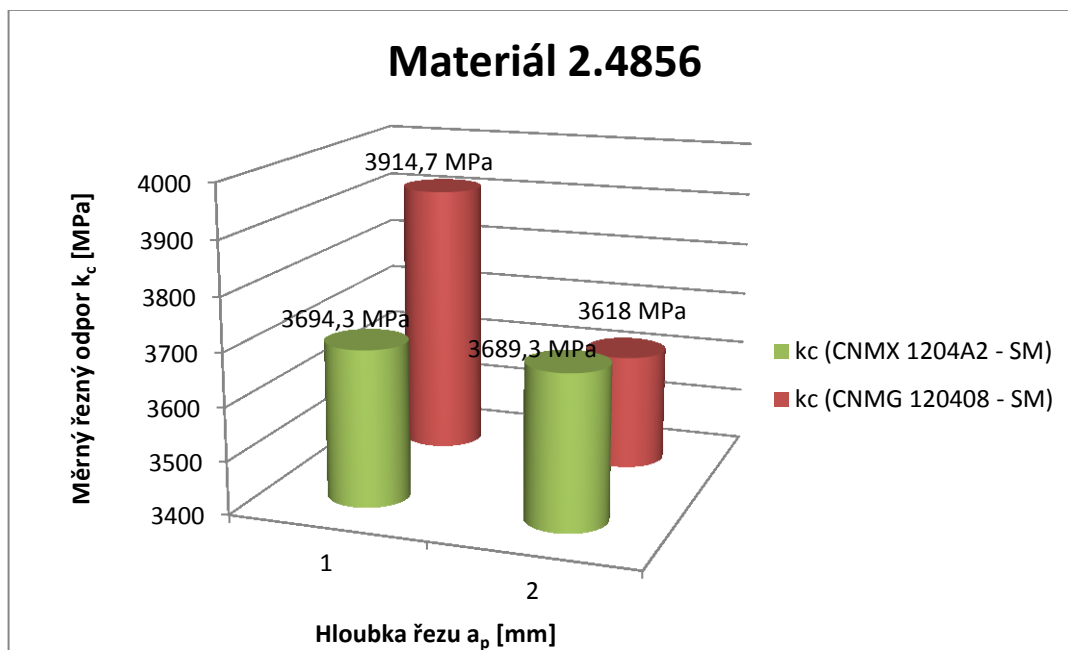


Graf 5.7 Závislost měrného řezného odporu na řezných podmínkách při obrábění oceli 1.1191

Na grafu 5.7 je zobrazena závislost měrného řezného odporu na řezných podmínkách při obrábění oceli 1.1191. Z grafu je možno vyčíst že nejvyšší hodnota měrného řezného odporu byla při obrábění vyměnitelnou břitovou destičkou CNMG 120408 – SM, při řezné rychlosti $v_c=180 \text{ m.min}^{-1}$, posuvu $f=0,2 \text{ mm}$ a hloubce řezu $a_p=2 \text{ mm}$, při těchto podmínkách byla také vyšší hodnota měrného řezného odporu než při obrábění VBD CNMX 1204A2 – SM řeznou rychlostí $v_c=180 \text{ m.min}^{-1}$, posuvem $f=0,4 \text{ mm}$ a hloubkou řezu $a_p=1 \text{ mm}$.

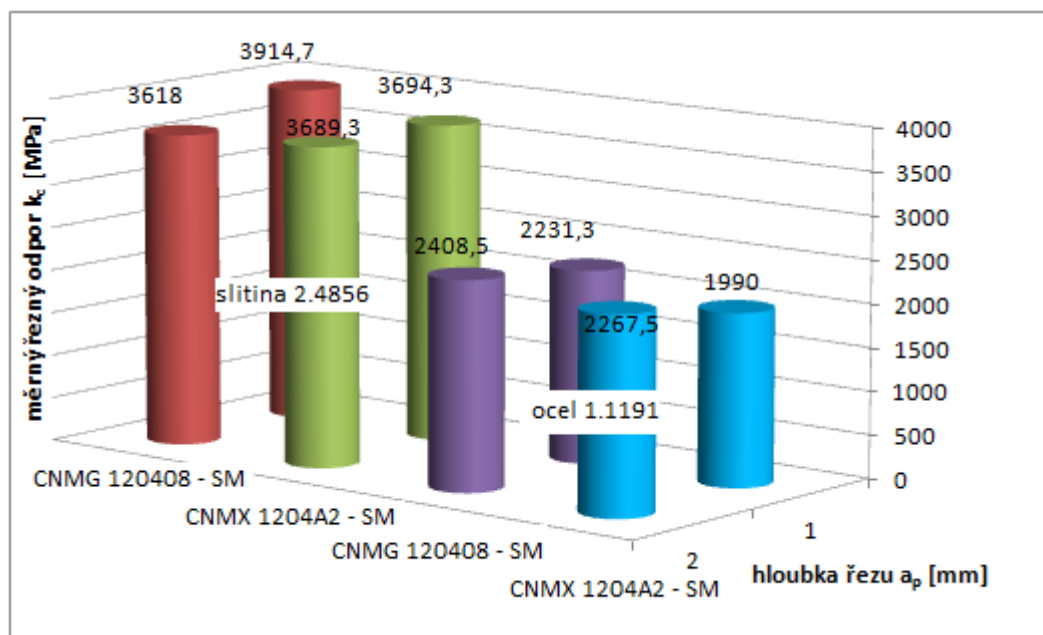
Tab. 5.17 Velikosti měrných řezných odporů při obrábění slitiny 2.4856

slitina 2.4856	$v_c = 40 \text{ m.min}^{-1}$	$a_p = 1 \text{ mm}$	$f = 0,3 \text{ mm}$
CNMG 120408 - SM	$k_c = 3914,7 \text{ MPa}$		
slitina 2.4856	$v_c = 40 \text{ m.min}^{-1}$	$a_p = 2 \text{ mm}$	$f = 0,15 \text{ mm}$
CNMG 120408 - SM	$k_c = 3618 \text{ MPa}$		
slitina 2.4856	$v_c = 40 \text{ m.min}^{-1}$	$a_p = 1 \text{ mm}$	$f = 0,3 \text{ mm}$
CNMX 1204A2 - SM	$k_c = 3694,3 \text{ MPa}$		
slitina 2.4856	$v_c = 40 \text{ m.min}^{-1}$	$a_p = 2 \text{ mm}$	$f = 0,15 \text{ mm}$
CNMX 1204A2 - SM	$k_c = 3689,3 \text{ MPa}$		



Graf 5.8 Závislost měrného řezného odporu na řezných podmínkách při obrábění slitiny 2.4856

Na grafu 5.8 je zobrazena závislost měrného řezného odporu na řezných podmínkách při obrábění slitiny 2.4856. Z grafu je možno vyčíst výrazný rozdíl hodnot měrného řezného odporu při obrábění vyměnitelnou břitovou destičkou CNMG 120408 – SM při daných odlišných řezných podmínkách. Jsou-li řezná rychlost $v_c=40 \text{ m.min}^{-1}$, posuv $f=0,3 \text{ mm}$ a hloubka řezu $a_p=1 \text{ mm}$, vychází vysoká hodnota měrného řezného odporu 3914,7 MPa, při obrábění stejnou VBD při daných odlišných řezných podmínkách klesla hodnota měrného řezného odporu téměř o 300 MPa, což je dáno zejména velikostí posuvu, ale také hloubkou řezu. Při obrábění vyměnitelnou břitovou destičkou se hodnoty měrných řezných odporů výrazně nelišily.



Graf 5.9 Srovnání hodnot měrných řezných odporů

Z grafu 5.9 je patrné, že při obrábění niklové slitiny 2.4856 jsou hodnoty měrných řezných odporů výrazně vyšší. Vysoké hodnoty při obrábění dané slitiny jsou dány jejími mechanickými a fyzikálními vlastnostmi. Při obrábění niklové slitiny 2.4856 při řezných podmínkách, kde byla dána řezná rychlost $v_c=40 \text{ m.min}^{-1}$, posuv $f=0,3 \text{ mm}$ a hloubka řezu $a_p=1 \text{ mm}$ jsou hodnoty měrných řezných odporů vyšší, než při obrábění řeznou rychlostí $v_c=40 \text{ m.min}^{-1}$, posuvem $f=0,15 \text{ mm}$ a hloubkou řezu $a_p=2 \text{ mm}$. U oceli 2.4856 je tomu naopak, při řezných podmínkách, kde byla dána řezná rychlost $v_c=180 \text{ m.min}^{-1}$, posuv $f=0,4 \text{ mm}$ a hloubka řezu $a_p=1 \text{ mm}$ jsou hodnoty měrných řezných odporů nižší, než při obrábění řeznými podmínkami kde je dána řezná rychlost $v_c=180 \text{ m.min}^{-1}$, posuv $f=0,2 \text{ mm}$ a hloubka řezu $a_p=2 \text{ mm}$. Je možno říct, že velikost měrného řezného odporu je dána druhem materiálu, řeznou rychlostí v_c , posuvem f , hloubkou řezu a_p , tedy průřezem třísky.

Závěr

Diplomová práce se zabývala průřezem odebírané vrstvy materiálu a jeho vlivem na měrný řezný odpor při soustružení oceli 1.1191 a slitiny 2.4856. Materiál 1.1191 se řadí mezi uhlíkové oceli a je etalonovým materiálem pro třídu ocelí. Materiál 2.4856 patří mezi niklové slitiny, vyznačuje se výbornými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi a to jak za nízkých, tak i při vysokých teplotách.

Cílem práce bylo naměření řezných složek sil během procesu obrábění a následné vyhodnocení naměřených dat. Obrábění bylo prováděno na soustružnickém centru NLX2500MC/700 od firmy DMG MORI ve vysokoškolských laboratořích VŠB – TUO v Ostravě. K obrábění byly použity 2 druhy vyměnitelných břitových destiček, a to CNMG 120408 – SM a CNMX 1204A2 – SM. Pro každou VBD byly zvoleny 2 druhy řezných podmínek a to tak, aby byl pro každý materiál přibližně stejných průřez třísky, při odlišných řezných podmínkách. Měření bylo provedeno pomocí třísložkového dynamometru Kistler a počítačového softwaru DynoWare. Po provedení měření složek sil byla u VBD provedena kontrola opotřebení na hřbetu i na čele pomocí binokulárního stereomikroskopu, který byl vybaven digitální kamerou. Díky zabudované digitální kameře bylo možné přenést snímky do počítače, kde byly následně pomocí programu Motic Images Plus pořízeny fotografie opotřebení.

Naměřené hodnoty složek řezných sil byly vyhodnoceny pomocí grafu, ve kterém byla použita filtrace, po odfiltrování vysokých rozkmitů byly zobrazeny průběhy řezných složek sil. Odfiltrované hodnoty byly statisticky zpracovány a následně byly vypočteny výsledné řezné síly pro každou vyměnitelnou břitovou destičku za daných řezných podmínek. Následně byl proveden výpočet měrného řezného odporu.

Z graficky zpracovaných dat je možno říct, že u niklové slitiny 2.4856 byly hodnoty měrného řezného odporu podstatně vyšší než při obrábění oceli 1.1191, to je dáno fyzikálními a chemickými vlastnostmi těchto materiálů. Při obrábění materiálu 2.4856 VBD CNMG 120408 – SM řeznými podmínkami, kde byla dána řezná rychlost $v_c=40$ m.min⁻¹, posuv $f=0,3$ mm a hloubka řezu $a_p=1$ mm, byla hodnota měrného řezného odporu vyšší, než při obrábění řeznou rychlostí $v_c=40$ m.min⁻¹, posuvem $f=0,15$ mm a hloubkou řezu $a_p=2$ mm. Při obrábění vyměnitelnou břitovou destičkou CNMX 1204A2 – SM byly hodnoty měrných řezných odporů odlišné jen nepatrně. U oceli 2.4856 při řezných podmínkách, kde byla dána řezná rychlost $v_c=180$ m.min⁻¹, posuv $f=0,4$ mm a hloubka řezu $a_p=1$ mm, byly hodnoty měrných řezných odporů nižší, než při obrábění řeznými

podmínkami kde byla dána řezná rychlost $v_c=180 \text{ m.min}^{-1}$, posuv $f=0,2 \text{ mm}$ a hloubka řezu $a_p=2 \text{ mm}$. Z takto naměřených výsledků se dá usoudit, že měrný řezný odpor závisí na vlastnostech materiálu, řezných podmínkách, ale také na geometrii a druhu nástroje.

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Tomášovi Zlámalovi za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Danielovi Venglošovi za pomoc při měření experimentu.

Použitá literatura

- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. [I]Nové směry v progresivním obrábění[I]. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [2] SANDVIK Coromant. *Příručka obrábění*. Praha : Scientia, s.r.o. Praha, 1997, 910 s. ISBN 91-972299-4-6.
- [3] KOČMAN, K.; PROKOP, J. *Technologie výroby 2: Řešené příklady* [online]. Brno, 2002 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TechnVyroby_II.pdf. Vysoké učení technické v Brně.
- [4] AXMANOVÁ, H. *MODERNÍ ŘEZNÉ NÁSTROJE PRO ZAPICHOVÁNÍ A UPICHOVÁNÍ* [online]. Brno, 2013 [cit. 2015-12-20]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65378. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Prof. Ing. MIROSLAV PÍŠKA, CSc.
- [5] HUMÁR, A. *Technologie I (Technologie obrábění – 1. část)*. Studijní opory pro magisterskou formu studia "Strojírenská technologie". Brno: VUT Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003. 138 s. Dostupné na World Wide Web: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/oporysave/TI_TO-1cast.pdf>.
- [6] MÁDL, J.; KAFKA, J.; VRABEC, M.; DVOŘÁK, R. *Technologie obrábění: 1. díl*. ČVUT, 2000.
- [7] Data Sheet, Type 9265B. *KISTLER group* [online]. 2009, 5.10.2012 [cit. 2015-12-21]. Dostupné z: <http://web.sensor-ic.com:8000/ZLXIAZAI/KISTLER/000-152e-12.09.pdf>
- [8] ZLÁMAL, T. *Příspěvek k obrábění Ni superslitiny a hodnocení řezivosti vybraných rezných materiálů*. Ostrava, 2015. 108 s. Disertační práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Školitel: doc. Ing. Robert ČEP, Ph.D.
- [9] KISTLER GROUP. 2009. *Cutting Force Measurement*. Soubor v PDF. [cit. 2016-01-22]. Dostupné z: WWW: <http://www.kistler.com>
- [10] NESLUŠAN, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2007, 349 s. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [11] ČEP, R. ZDROJE TEPLA A TEPELNÁ BILANCE [online]. In: .s. 8 [cit.2016-01-25]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_03.pdf

- [12] HUMÁR, A. Výrobní technologie II [online]. Studijní opory pro podporu samostudia v oboru "Strojírenská technologie" BS studijního programu "Strojírenství". VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2002. 84 s. Dostupné na World Wide Web: < http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/VyrobníTechnologie_II.pdf >.
- [13] TICHÁ, Š. *Strojírenská metrologie: část I.* [online]. Ostrava: Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava, 2004 [cit. 2016-01-25]. Dostupné z: <http://books.fs.vsb.cz/StrojMetro/strojirenska-metrologie.pdf>
- [14] Kontrola drsnosti povrchu. Elektronická učebnice [online]. 2015, [cit. 2016-01-25]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1102>
- [15] JERSÁK, J. *Řezné podmínky při obrábění.* Technická univerzita v Liberci: Katedra obrábění a montáže [online]. 2001 [cit. 2016-01-25]. Dostupné z: http://www.kom.tul.cz/soubory/tob_rp.pdf
- [16] VLK, Š. *Obrábění hliníkové slitiny:* diplomová práce. Ostrava VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2015, 70s. Vedoucí práce: Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
- [17] DMG MORI. *CNC univerzální soustruh NLX 2500MC/700.* [Online]. [cit. 2016-01-26]. Dostupné z WWW: <http://cz.dmgmori.com/products/lathes/universal-lathes/nlx/nlx2500+700>
- [18] HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje.* Brno: MM Publishing Praha, 2008, 235s. ISBN 978-80-254-2250-5.
- [19] VALLA, T. *Vliv opotřebení na řezivost VBD při obrábění speciálních slitin.* Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2015, 86 s.
- [20] PAVELKA, R. *ANALÝZA VYMĚNITELNÝCH BŘITOVÝCH DESTIČEK ZE SLINUTÝCH KARBIDŮ* [online]. Brno, 2010 [cit. 2016-02-09]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28233. DIPLOMOVÁ PRÁCE. FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE. Vedoucí práce Ing. KAREL OSIČKA, Ph.D.
- [21] PRAMET TOOLS, s.r.o. *Soustružení 2014: Katalog společnosti* Pramet Tools[online]. Šumperk: Pramet Tools, s.r.o.,2014. 399 s. [cit. 2016-02-09]. Dostupné z: <http://www.dormerpramet.com/downloads/turning-2014-cz-sk.pdf>

- [22] PRAMET TOOLS, s.r.o. *Zrození nové generace. Nové soustružnické materiály řady T8300 s PVD povlakem*: Katalog společnosti Pramet Tools[online]. Šumperk: Pramet Tools, s.r.o., 12 s. [cit. 2016-02-24]. Dostupné z: <https://katalog.mav.cz/data/upload/files/38054-nove-rezne-materialy-t83xx.pdf>
- [23] *ECatalog Pramet Tools s.r.o.* [online]. [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://ecat.pramet.com/tool.aspx>
- [24] SANDVIK Coromant: *General turning*.2014 [online]. [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general_turning/pages/default.aspx
- [25] SANDVIK Coromant [online]. Soustružnická příručka.[cit. 2016-3-14]. Dostupné z: http://sandvik.ecbook.se/se/cs/turning_handbook/
- [26] Specialmetals.com [online]. c2015 [cit. 2016-03-22]. *Machinig Special Metals Corporation Products*. Dostupné z WWW: <http://www.specialmetals.com/assets/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-625.pdf>
- [27] Sandvik Coromant: *Nástroje. Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2016-03-22]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products>
- [28] VASILKO, K. *Technológia dokončovania povrchov*. Prešov, Slovenská republika : Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove. 2004. s. 115. ISBN 80 8073 124-1.
- [29] *Insert CNMG 12 04 08-SM 1105 for T-Max P* [online]. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/engb/products/Pages/productdetails.aspx?c=cnmg+432-sm+1105&m=5915046>
- [30] TICHÁ, Š.: *Strojírenská metrologie*. Ostrava, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2006. s. 112. ISBN 80-248-0671-1.
- [31] VASILKO, K. *Technológia dokončovania povrchov*. Prešov, Slovenská republika : Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove. 2004. s. 115. ISBN 80 8073 124-1.
- [32] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II – 1. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB – TU Ostrava. ISBN 978–80–248–1641–8.
- [33] KOCMAN, K.; PROKOP, J.: *Technologie obrábění*. CERM Brno, 2003, s. 271, ISBN 80-214-1996-2.
- [34] *Technologie II – 2. díl* [online]. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_2dil.pdf

Práce byla podpořena ze Studentské grantové soutěže Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava v rámci projektu SP2016/172 Vliv technologických parametrů na obrobený povrch a SP2016/174 Studium procesu obrábění progresivních materiálů s cílem zvýšit a podpořit vědecko-výzkumné aktivity studentů doktorských a magisterských studijních programů ve spolupráci s akademickými pracovníky.